Lorsqu'un poteau est long, de petits défauts de rectitude et d'alignement (Fig. 4'), font en sorte qu'il n'est jamais parfaitement droit et vertical. Ces défauts conduisent à l'excentricité (e) de la charge P par rapport à son centre, ce qui provoque un moment de flexion (M= P*e).

Le moment de flexion (M) provoque à son tour une déformation additionnelle du poteau qui a pour effet d'accroitre l'excentricité (e) de la charge, ce qui à son tour fait augmenter le moment de flexion interne (M) et ainsi de suite.

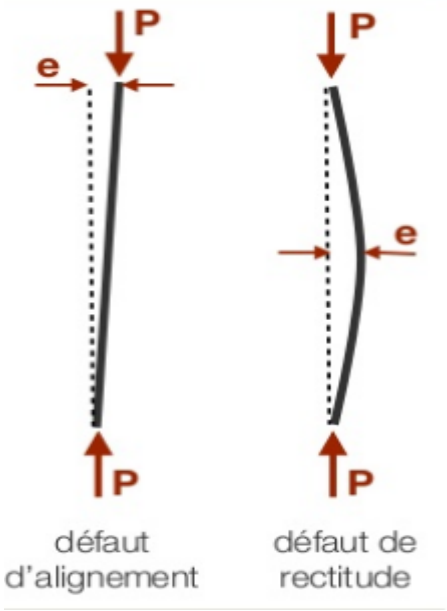


Figure 4'. Imperfections géométriques

Si la charge imposée au poteau (P) demeure en dessous d'une charge limite ou Critique (Pcr ou Ncr), la déformation du poteau finit par se stabiliser. En revanche si cette charge excède la charge critique appelée charge critique d'Euler[1] la déformée augmente constamment et provoque une rupture soudaine et Brutale du poteau, c'est le phénomène de *Flambement ou Flambage*.

Vierendeel[2] attire l'attention sur le danger des pièces comprimées dans les constructions métalliques. Il écrit

"*On peut dire que sur Dix écroulements survenus dans les constructions métalliques, IL y en a huit dus au flambage*."

La particularité dangereuse des pièces comprimées est qu'elles cèdent brusquement sans que leur faiblesse ne se dévoile à l'œil par aucun indice, aucun signe avant-coureur évident.

Il faut employer les formules de flambage avec prudence, c'est-à-dire en prenant un coefficient de sécurité très grand. Les pièces soumises au flambage doivent impérativement être droite et ne doivent pas avoir subi des déformations précédemment.

[1] **Leonhard Euler (1707-1783) :** Mathématicien et Physicien suisse
[2] **Vierendeel Arthur (1852 - 1940) :** ingénieur belge.

Le danger d'instabilité existe donc dans toute structure comprimée. Nous en avons de 3 sortes :

- Flambement (compression pure)
- Déversement (flexion)
- Voilement (torsion)

Et les phénomènes d'instabilité peuvent être de 2 types, soit :

- Locaux (barres de treillis, voilement, …)
- Globaux (flambement d'ensemble, ...) Fig. 4''

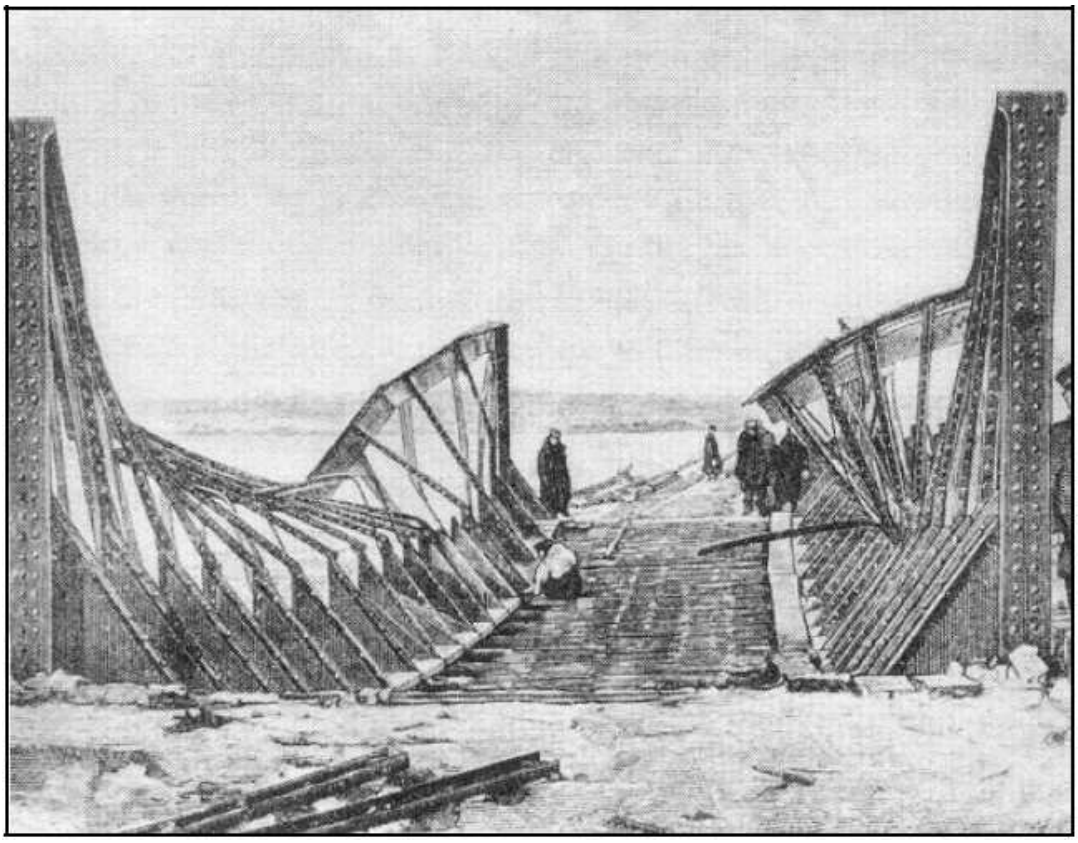
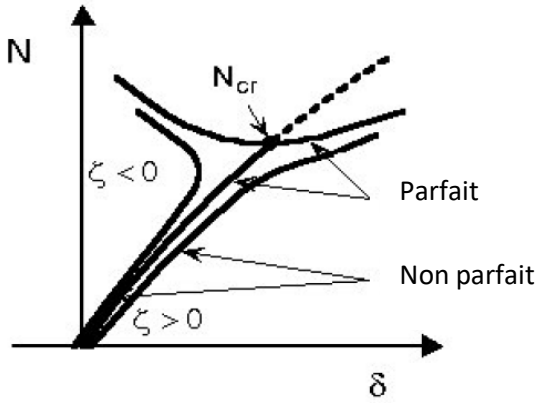


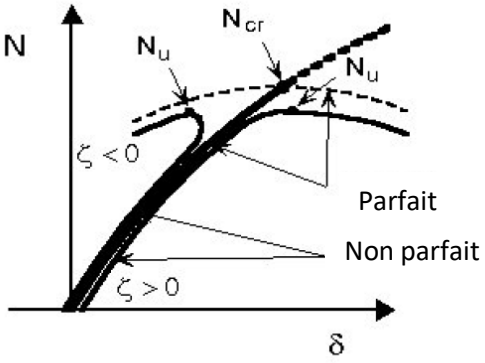
Figure 4''. Flambement d'ensemble de la membrure supérieure des poutres en treillis D'un pont de chemin de fer (Russie, vers 1890).

5. COMPORTEMENT POST-CRITIQUE DE SYSTEMES PARFAITS ET NON-PARFAITS

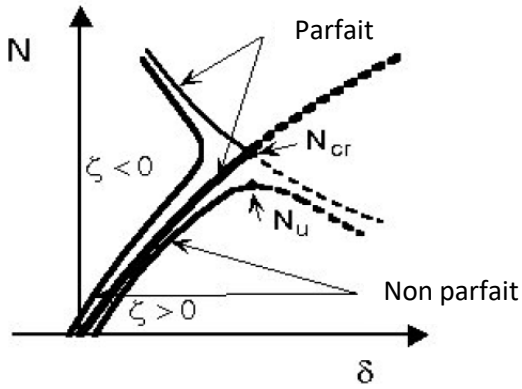
Au-delà du point de bifurcation, on rencontre principalement trois situations possibles, selon le type de système à étudier (figure 5).



a) Stable. Point de Bifurcation Symétrique



b) Instable. Point de Bifurcation Symétrique



c) Point de Bifurcation Asymétrique

Figure 5. Comportement post-Critique

Sur cette figure, N représente la charge appliquée, δ le déplacement d'un point du système et ζ l'amplitude de l'imperfection. Les traits épais représentent les lignes d'équilibre de systèmes parfaits, les traits fins les lignes d'équilibre de systèmes non-parfaits ; les traits continus représentent l'équilibre stable et les traits pointillés l'équilibre instable :

Figure 5a : point de bifurcation symétrique - stable

Des imperfections petites, positives ou négatives ont les mêmes effets et donnent lieu à une trajectoire stable d'équilibre vers le haut. Le flambement se caractérise par une augmentation rapide du déplacement lorsque l'on s'approche de la charge critique du système parfait. Ce cas

est très important en pratique car les poteaux, poutres et plaques présentent ce type de comportement post-critique.

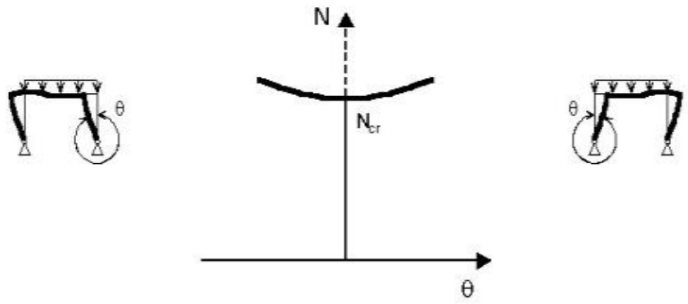
Figure 5b : point de bifurcation symétrique - instable

Les imperfections jouent un rôle important dans la modification du comportement du système. De petites imperfections des deux signes induisent une diminution de la charge critique. C'est par exemple le cas de certains systèmes composés de barres articulées.

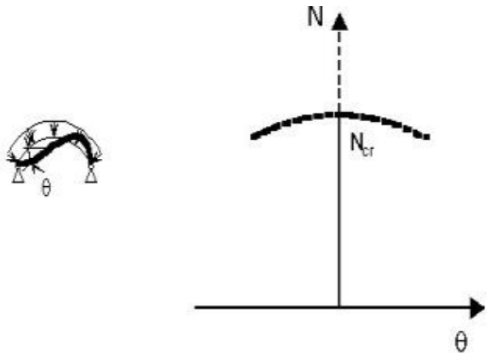
Figure 5c : point de bifurcation asymétrique

Pour des imperfections positives faibles, le système perd sa stabilité en un point limite (charge ultime), largement plus faible, comparé au point critique. D'autre part des imperfections négatives faibles conduisent à une trajectoire vers le haut, stable. Ici, le système est surtout sensible à des imperfections initiales positives. C'est par exemple le cas de certaines poutres à treillis.

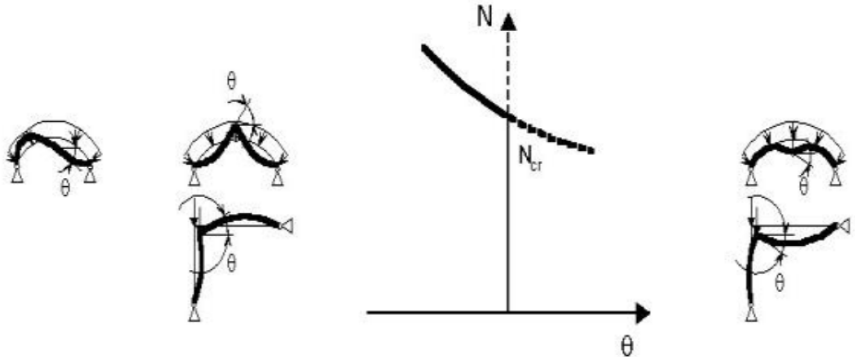
La figure 6 illustre ces trois comportements post-critiques.



a) Stable. Point de Bifurcation Symétrique



b) Instable. Point de Bifurcation Symétrique



c) Point de Bifurcation Asymétrique

Figure 6. Exemple de Comportement post-Critique

6. FLAMBEMENT AVEC POINT LIMITE

Le flambement associé à une bifurcation d'équilibre n'est pas la seule forme d'instabilité que l'on peut rencontrer. Dans le cas des arcs, des treillis de faible hauteur et des dômes sphériques, par exemple, un flambement de changement de position d'équilibre, se produisant avec un claquement sec peut avoir lieu quand le trajet initialement stable perd sa stabilité dès que l'on atteint localement une valeur maximum de la charge, appelée « point limite » du système.

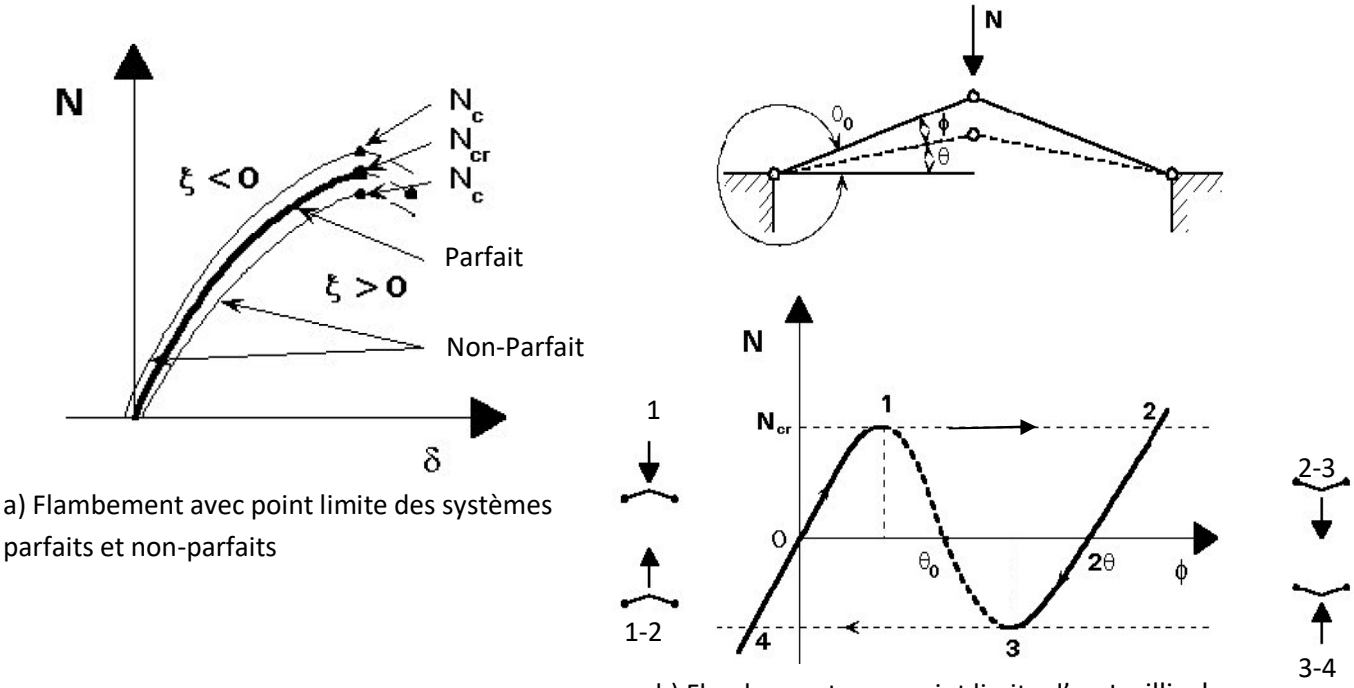


Figure 7. Flambement avec point Limite « Limit Point Buckling »

Ceci est représenté sur la figure 7a, on peut voir aussi sur ce schéma que la réponse d'un système non-parfait est semblable à celle du système parfait correspondant.

La figure 7b illustre ce comportement de flambement en considérant un treillis de faible hauteur fait de deux barres articulées. Quand on commence à appliquer la charge, on suit un chemin stable 0-1. Au point 1, le système perd sa stabilité ; entre les points 1 et 2, on a un saut dynamique à travers des états de non-équilibre et le treillis se retrouve à l'envers (changement brutal de position d'équilibre, le passage d'un état à l'autre donnant lieu à un claquement sec). Le point 2 se trouve aussi sur un chemin stable et le chargement peut continuer. Par exemple, une séquence de déchargement suit le chemin stable entre les points 2 et 3, pour lequel, une fois de plus, il y a perte de stabilité conduisant la structure au saut dynamique entre les points 3 et

4. Au point 4, la structure se retrouve sur son chemin stable d'origine et un nouveau cycle de chargement peut commencer. Ceci montre que la ligne pointillée entre les points 1 et 3 qui représente les états d'équilibre instable, est totalement inaccessible pendant le processus de chargement.

7. COÏNCIDENCE DE PLUSIEURS MODES D'INSTABILITE

Dans certains cas, les structures peuvent présenter plusieurs modes d'instabilité, presque pour les mêmes valeurs des charges critiques ou pour des charges critiques très voisines. Dans ces cas, appelés bifurcations couplées, les imperfections peuvent conduire à une diminution significative de la charge ultime par rapport aux charges ultimes des modes pris séparément. Les problèmes de bifurcation couplée sont en général difficiles à analyser. Certaines instabilités couplées que l'on peut rencontrer dans les structures en acier sont mentionnées ci-dessous :

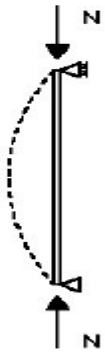
- Couplage du flambement de poteau et du voilement dans les poteaux à âme mince,
- Couplage du flambement latéral et du voilement dans les poutres à âme mince,
- Couplage du flambement généralisé et du flambement d'éléments dans les poteaux à treillis,
- Couplage du flambement individuel de poteau et du flambement généralisé de l'ossature,
- Couplage du flambement des raidisseurs et du voilement pour des plaques ou coques raidies.

La figure 8 montre la diminution de la charge de flambement due au couplage d'un mode de flambement local avec un mode global, de la manière suivante :

- Flambement local des plaques formant les quatre côtés d'une section carrée creuse,
- Flambement global d'Euler du poteau.

Mode Séparé :

Flambement Local des plaques



Flambement Global du poteau (parfait)

Mode combiné (Coïncidence ou Couplage) :

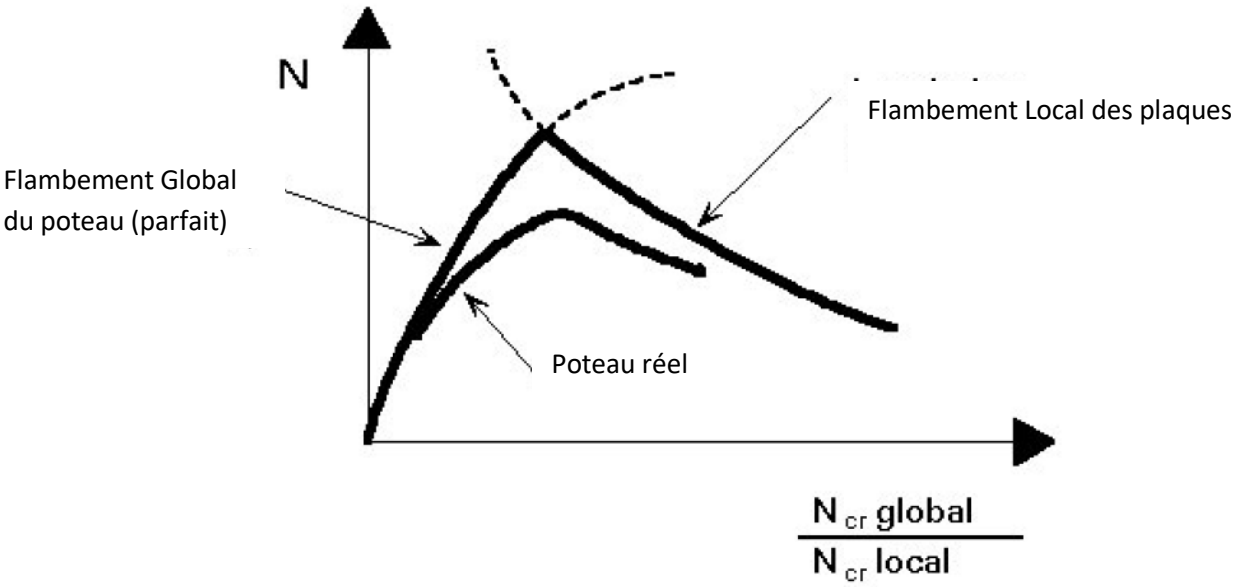


Figure 8. Couplage de Deux Modes de Flambement

8. CONCLUSION

- Les états d'équilibre stable et instable d'une structure peuvent être définis au moyen de l'énergie potentielle du système ; l'existence d'un minimum relatif de l'énergie potentielle est une condition suffisante de stabilité.
- Le point de bifurcation ou le point limite définit la forme d'instabilité d'une structure.
- Le comportement post-critique est une caractéristique importante d'une structure.
- Si une structure peut présenter plusieurs modes d'instabilité pour presque la même valeur de la charge critique, les imperfections de structure conduiront à une diminution de la charge ultime par rapport aux charges ultimes correspondant aux modes pris séparément.