



CM : STRUCTURE 1

CYCLE LICENCE S3/S4

Marc LEYRAL

Sylvain EBODE

S1-C7

LE FLAMBEMENT

*Description d'un phénomène d'instabilité
structurale des éléments comprimés*



1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. ÉCHAUFFEMENT

Le mentaliste



Trop fort ! J'ai réalisé un programme qui lit dans vos pensées...

Si! C'est vrai. Regardez.

1) Choisissez un nombre à deux chiffres

(Ex. : 25)

2) Retirez à ce nombre la somme de ses deux chiffres

(Ex. : $25 - (2+5) = 18$)

C'est bon ?

1. ÉCHAUFFEMENT

Le mentaliste

Trouvez le nombre dans la grille et concentrez vous sur le symbole à sa droite.

109	♈	108	◆	107	☠	106	⚙	105	◯	104	◻	103	❄	102	♋	101	♁	100	☞	99	■
98	◯	97	◻	96	😊	95	☠	94	⌚	93	💣	92	☒	91	💣	90	♈	89	♁	88	⌘
87	♋	86	♎	85	☠	84	⚙	83	■	82	◯	81	●	80	♋	79	✚	78	✚	77	⌚
76	❄	75	♋	74	☠	73	♋	72	●	71	☒	70	✋	69	💣	68	☠	67	◻	66	☠
65	♎	64	●	63	●	62	⌚	61	♈	60	✚	59	☒	58	💣	57	♣	56	☒	55	💣
54	●	53	✋	52	♣	51	♎	50	●	49	⌚	48	☞	47	☠	46	◯	45	●	44	✋
43	❄	42	♋	41	⌘	40	♋	39	♃	38	☒	37	♃	36	●	35	✚	34	💣	33	😊
32	♣	31	♣	30	♋	29	◯	28	❄	27	●	26	♈	25	♁	24	☒	23	😊	22	✋
21	♋	20	◯	19	☞	18	●	17	♈	16	❄	15	⚙	14	✋	13	❄	12	☠	11	◆
10	●	9	●	8	♈	7	♈	6	⌚	5	◆	4	☞	3	✚	2	❄	1	♣	0	●

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

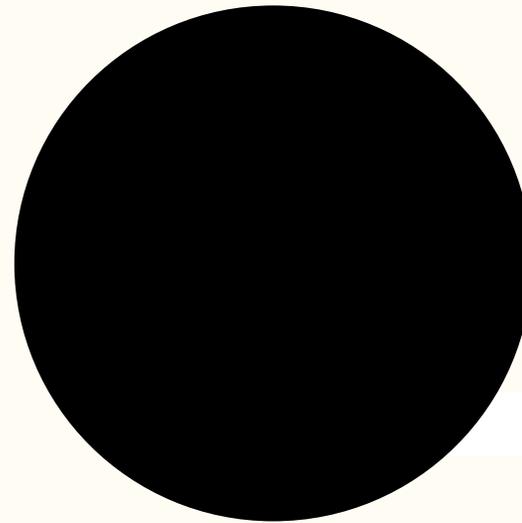
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. ÉCHAUFFEMENT

Le mentaliste

Badam !



On recommence ?

Choisissez un autre nombre et refaites l'opération.

1. ÉCHAUFFEMENT

1. Échauffement 10'
2. Rappels 10'
3. Cours 50'
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique
4. Application 15'
5. Bilan 5'

Le mentaliste

Trouvez le nombre dans la grille et concentrez vous sur le symbole à sa droite.

109	⌚	108	☠	107	⌚	106	⚡	105	✚	104	⚡	103	✋	102	♁	101	✋	100	⌚	99	♊
98	⚙	97	☾	96	⌘	95	✚	94	♋	93	☠	92	💧	91	⌘	90	☠	89	⌘	88	💧
87	⚙	86	💣	85	■	84	✉	83	♠	82	💣	81	⚙	80	💣	79	⚙	78	♋	77	⌚
76	⚙	75	⚡	74	□	73	♊	72	⚙	71	♋	70	♋	69	◆	68	❄	67	♊	66	♈
65	⚙	64	♊	63	⚙	62	⚙	61	☠	60	✋	59	✉	58	⚡	57	♁	56	⚙	55	⌘
54	⚙	53	☾	52	⚙	51	⌚	50	⌘	49	⌘	48	💣	47	♋	46	✉	45	⚙	44	◆
43	⌘	42	💣	41	♊	40	😊	39	♠	38	♊	37	♠	36	⚙	35	😊	34	😊	33	□
32	♠	31	💣	30	♊	29	□	28	❄	27	⚙	26	■	25	✚	24	□	23	⚙	22	❄
21	♋	20	☾	19	💣	18	⚙	17	♁	16	✚	15	♋	14	⚡	13	😊	12	⚡	11	✋
10	⚙	9	⚙	8	✉	7	⚙	6	⚙	5	♊	4	✉	3	☠	2	⌚	1	♋	0	⚙

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

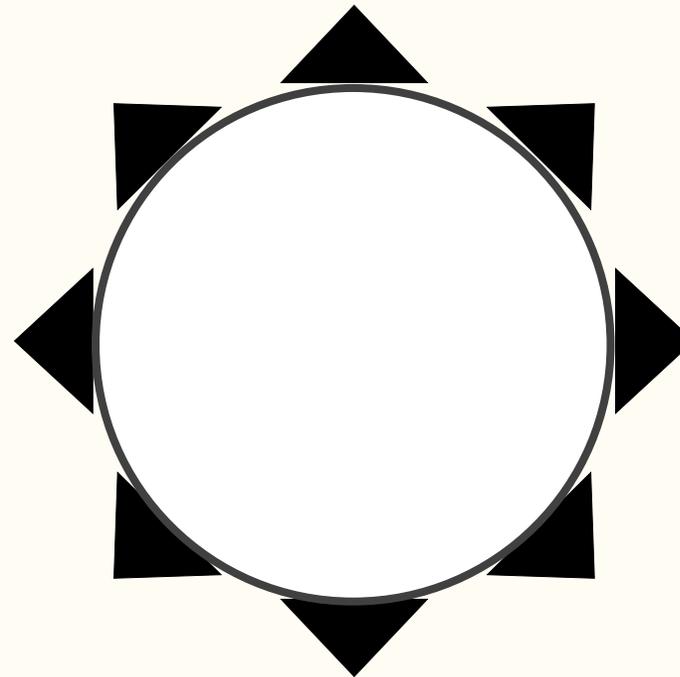
S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. ÉCHAUFFEMENT

1. ECHAUFFEMENT

Le mentaliste

Badam !



Encore ???

Choisissez un dernier nombre et refaites l'opération.

1. ÉCHAUFFEMENT

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

Le mentaliste

Trouvez le nombre dans la grille et concentrez vous sur le symbole à sa droite.

109	😊	108	◆	107	💧	106	◆	105	◆	104	⌚	103	✚	102	♊	101	♏	100	♈	99	⌚
98	◆	97	⚙️	96	❄️	95	♋	94	□	93	⚙️	92	♈	91	👤	90	♎	89	☒	88	💧
87	✚	86	♊	85	♊	84	🌸	83	■	82	●	81	👤	80	💧	79	👤	78	✚	77	🌸
76	❄️	75	✚	74	♈	73	💧	72	👤	71	✚	70	😊	69	😊	68	♊	67	👤	66	✚
65	☒	64	💧	63	👤	62	♋	61	♏	60	🌸	59	😊	58	♋	57	⚙️	56	○	55	✚
54	👤	53	☠️	52	❄️	51	○	50	♊	49	😊	48	👤	47	🌊	46	●	45	👤	44	♏
43	○	42	♎	41	🌸	40	♎	39	♋	38	♋	37	□	36	👤	35	✚	34	💧	33	👤
32	■	31	○	30	⌚	29	♈	28	♋	27	👤	26	😊	25	👤	24	♋	23	♋	22	☒
21	✚	20	⚙️	19	😊	18	👤	17	♏	16	■	15	■	14	✚	13	♏	12	■	11	⚙️
10	❄️	9	👤	8	👤	7	💧	6	⚙️	5	😊	4	⌚	3	□	2	✚	1	✚	0	👤

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

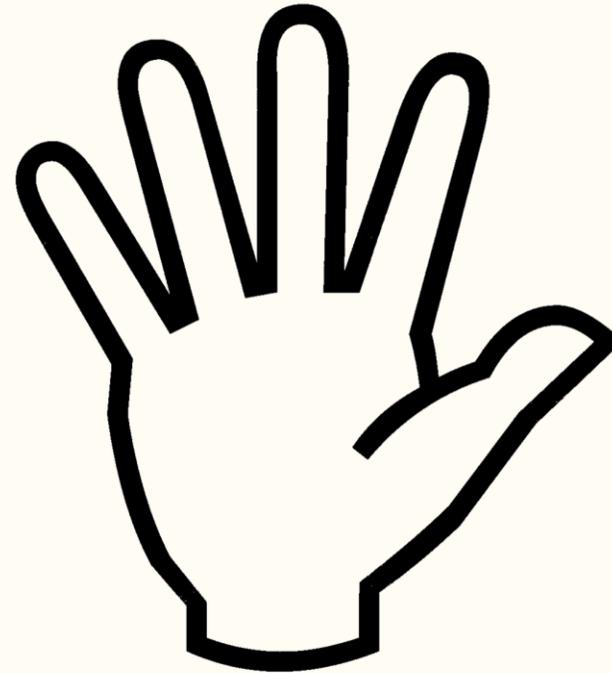
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. ÉCHAUFFEMENT

Le mentaliste

Badam !



ALORS ? COMMENT J'AI FAIT ?

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

1. ÉCHAUFFEMENT

Le mentaliste

Un nombre auquel on retire la somme de ses deux chiffres et toujours un multiple de 9.

Il suffit de placer toujours le même symbole sur les multiples de 9.

Démonstration : Prenons un nombre N de deux chiffres au hasard : $N = AB$ (A étant le chiffre des dizaines et B le chiffre des unités).

$$N = 10 \times A + B \quad (\text{ex. } 25 = 10 \times 2 + 5)$$

$$N - (A+B) = 10 \times A + B - (A + B) = 10 \times A - A + B - B = 9 \times A : \text{multiple de 9.}$$

109	☺	108	◆	107	☀	106	◆	105	◆	104	⌚	103	♠	102	♊	101	♋	100	♈	99	⌚
98	◆	97	☀	96	☁	95	♋	94	□	93	☀	92	♊	91	✋	90	♋	89	✉	88	☀
87	⌘	86	♊	85	♋	84	☀	83	■	82	●	81	✋	80	☀	79	✋	78	♠	77	☀
76	☁	75	✚	74	♈	73	☀	72	✋	71	⌘	70	☺	69	☺	68	♋	67	✋	66	⌘
65	✉	64	☀	63	✋	62	♋	61	♋	60	☀	59	☺	58	♋	57	☀	56	○	55	✚
54	✋	53	☠	52	☁	51	○	50	♊	49	☺	48	✋	47	⚡	46	●	45	✋	44	♋
43	○	42	♋	41	☀	40	♋	39	♋	38	♋	37	□	36	✋	35	⌘	34	●	33	✋
32	■	31	○	30	⌚	29	♊	28	♋	27	✋	26	☺	25	✋	24	♋	23	♋	22	✉
21	✚	20	☀	19	☺	18	✋	17	♋	16	■	15	■	14	✚	13	♋	12	■	11	☀
10	☁	9	✋	8	✋	7	●	6	☀	5	☺	4	⌚	3	□	2	✚	1	♠	0	✋

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. ÉCHAUFFEMENT

Question du jour :



S1-C7 LE FLAMBEMENT

2. RAPPELS

LA DESCENTE DE CHARGES

Pour effectuer une descente de charges, on effectue systématiquement **6 étapes** :

1 – Identifier les éléments

	FRANCHIR	PORTER	CONTREVENTER
Fonction	Reprendre les charges et les distribuer vers les porteurs	Porter et descendre les charges vers le sol	Contreventer = résister aux actions horizontales
Eléments	Poutres, poutres voiles, treillis 3D	un étai (ex. poteau, voile) un tirant (ex. câble)	Croix de Saint André, encastrement, ...
Fonctionnement	Flexion (= compression + traction)	Compression (étais) Traction (tirant)	Dépend du type de contreventement



Poutre IPE en acier



*Salle hypostyle – IMA
Jean Nouvel - 1987*



*Centre Pompidou
Rogers/Piano– Paris - 1972*

**SOMMAIRE – S1-C7
LE FLAMBEMENT**

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'
- a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'
- a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique

4. Application 15'

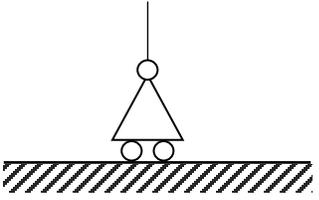
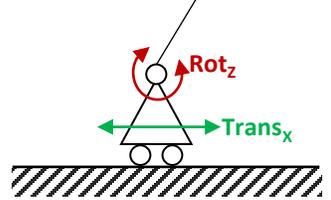
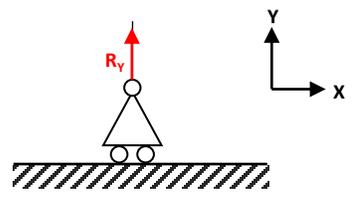
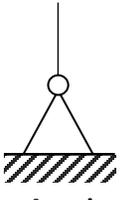
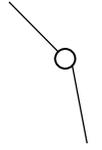
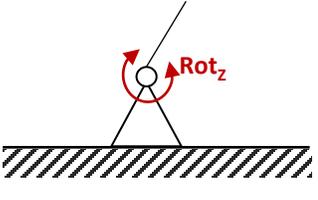
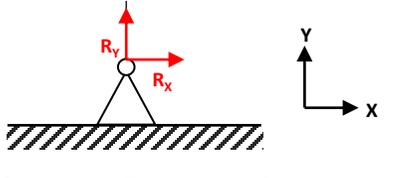
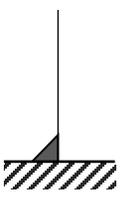
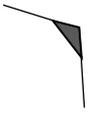
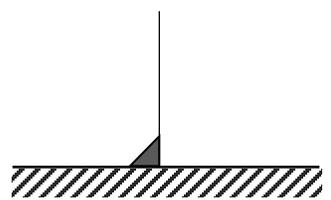
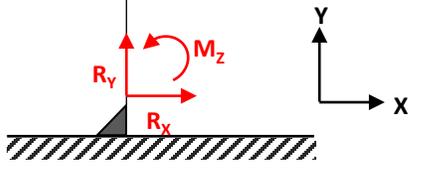
5. Bilan 5'

2. RAPPELS

LA DESCENTE DE CHARGES

Pour effectuer une descente de charges, on effectue systématiquement 6 étapes :

2 – Identifier les liaisons et les appuis

	REPRÉSENTATION	DEGRÉS DE LIBERTÉ	RÉACTIONS ET INCONNUES STATIQUES
APPUIS SIMPLE	 Appui	 DDL : 1 translation + 1 rotation	 1 Réaction en force = 1 inconnue
ROTULE	 Appui  Liaison	 DDL : 1 rotation	 2 Réactions en force = 2 inconnues
ENCASTREMENT	 Appui  Liaison	 DDL : aucun	 2 Réactions en force + 1 Réaction en moment = 3 inconnues

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

2. RAPPELS

LA DESCENTE DE CHARGES

Pour effectuer une descente de charges, on effectue systématiquement **6 étapes** :

3 – Réaliser le schéma statique

On trace uniquement:

- Les **éléments structurels** dessinés sous forme de **barres** (un trait).
- Les **liaisons** et les **appuis**
- Les **forces** en jeu et les **distances**

4 – Calcul du degré de staticité

Le degré de staticité h vaut : $h = i - n$

- i est le nombre d'**inconnues statiques** au niveau des nœuds
- n est le nombre d'**équations** : 3 équations par barre

$h < 0$: système hypostatique
Équilibre instable / mécanisme
il faut ajouter des blocages

$h = 0$: système isostatique
Juste assez d'appuis et de DDL
Calcul facile

$h > 0$: système hyperstatique
Plusieurs équilibres stables
Sécurité mais calcul difficile

S1-C7 LE FLAMBEMENT

2. RAPPELS

LA DESCENTE DE CHARGES

Pour effectuer une descente de charges, on effectue systématiquement **6 étapes** :

5 – Analyse structurale (= analyse des charges)

TYPE DE CHARGES	PONCTUELLES (N)	LINEIQUES (N/ml)	SURFACIQUES (N/m ²)
Illustration			

CATEGORIES DE CHARGE

CHARGES PERMANENTES	Structurales (G) si elles participent à la structure (murs porteurs, poteaux, poutres, dalles)
	Non structurelle (G') si elle ne participe pas à la structure (revêtements, cloisons, etc.)
CHARGES VARIABLES	D'exploitation (Q) : poids des usagers, des meubles, etc.
	Climatiques : vent (W), neige (S)
AUTRES CHARGES	Charges accidentelles : séisme, choc de camion, etc.

ETAT LIMITES	DE SERVICE (ELS)	ULTIME (ELU)
Critères	Il s'agit d'un critère d'usage . Sous des charges normales , le bâtiment ne doit pas trop se déformer	Il s'agit d'un critère de sécurité . Sous des conditions extrêmes , le bâtiment ne doit pas s'écrouler
Combinaison	1*(G+G') + 1*Q + 0,6*W	1,35*(G+G') + 1,5*Q + 0,9*W 1,35*(G+G') + 1,05*Q + 1,5*W

SOMMAIRE – S1-C7
LE FLAMBEMENT

1. Échauffement **10'**

2. Rappels **10'**

3. Cours **50'**

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application **15'**

5. Bilan **5'**

S1-C7 LE FLAMBEMENT

2. RAPPELS

LA DESCENTE DE CHARGES

Pour effectuer une descente de charges, on effectue systématiquement **6 étapes** :

6 – Application du Principe Fondamental de la Statique (PFS)

1. Définition d'un **repère orthonormé** et d'un sens de rotation conventionnellement positif
2. Lister des **forces verticales** et des **forces horizontales**
3. Décomposition des **forces obliques** en composantes horizontales et verticales
4. Appliquer le **PFS** (ordre à déterminer judicieusement en fonction des forces et des inconnues recherchées) :

- sur **les forces** dans le sens gravitaire (**en Y**)

$$\sum F_Y = 0$$

- sur **les forces horizontales** (**en X**)

$$\sum F_X = 0$$

- sur **les moments** en un point choisi judicieusement (ex. un appui) pour éliminer une ou plusieurs inconnues

$$\sum M_A(\vec{F}) = 0$$

SOMMAIRE – S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

1. Échauffement 10'
2. Rappels 10'
3. Cours 50'
 - a. **Présentation**
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique
4. Application 15'
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.a. Présentation

L'ÉTUDE DU FLAMBEMENT : À QUOI ÇA SERT?

- Connaître un phénomène très dangereux pour les structures
- Comprendre un phénomène souvent dimensionnant et savoir l'appliquer pour faire des projets réalistes.

PRÉREQUIS : QUELQUES NOTIONS DE BASES SONT SUFFISANTES

1. Savoir ce qu'est la compression
2. Un peu de bon sens

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

a. Présentation

b. Introduction

c. Approche analytique

d. Approche énergétique

4. Application 15'

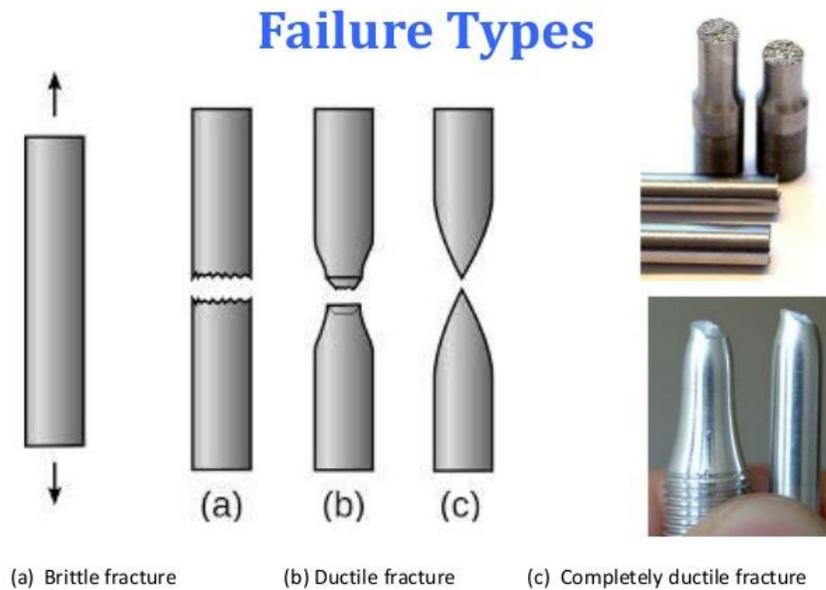
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.b. Introduction

INTRODUCTION : LES RUPTURES DE PREMIER ORDRE

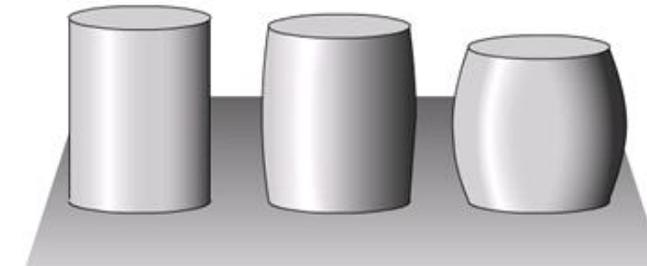
- On connaît les ruptures « classiques » en traction et en compression



TRACTION



Brittle Failure



Ductile Failure

COMPRESSION

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

a. Présentation

b. Introduction

c. Approche analytique

d. Approche énergétique

4. Application 15'

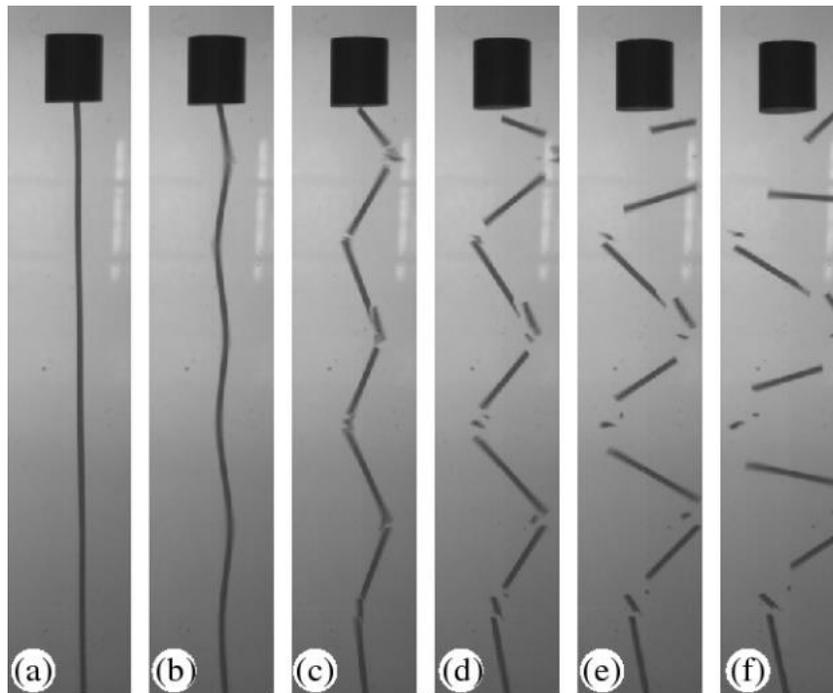
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.b. Introduction

INTRODUCTION : LE FLAMBEMENT : UNE INSTABILITÉ DE SECOND ORDRE

- En compression (et uniquement en compression), il existe une rupture provoquée par une instabilité : le **flambement**
- L'**élément comprimé**, au bout d'une **certaine force axiale**, cesse de fonctionner en compression pour **fonctionner en flexion**
- Malgré son nom ce phénomène **n'a rien à voir avec le feu !**



Flambement de : un spaghetti



une règle en plastique



La canne de Charlot

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction**
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.b. Introduction

INTRODUCTION : LA FORCE CRITIQUE DE FLAMBEMENT

- Un spaghetti résiste à **10 kg en traction** mais seulement à **2 kg en compression** avant de flamber. Pourtant, la force qui aurait provoqué une rupture classique en compression était supérieure. 2 kg, c'est la **force critique de flambement** du spaghetti.

La force critique de flambement dépend :

- De l'**élancement** de l'élément
 - Plus l'élément est élancé, plus sa force critique est faible.
- Des ses **appuis** (libre, rotulé ou encasté)
 - La force critique est plus élevée pour un élément encasté que pour une barre articulée



Flambement d'un spaghetti

S1-C7 LE FLAMBEMENT

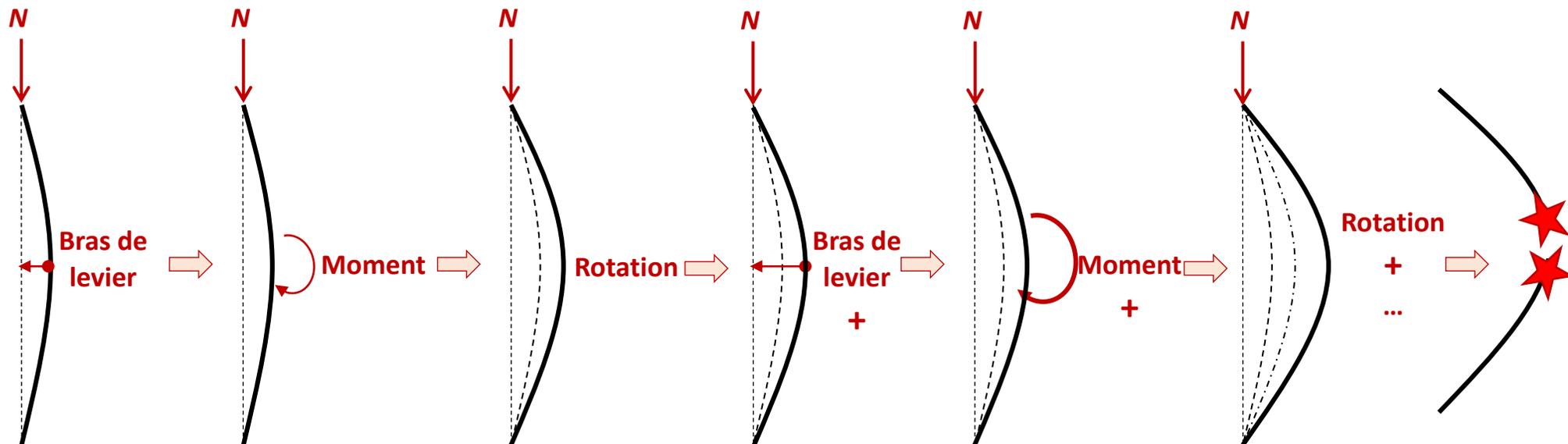
3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT

Qualitativement, comment se passe le flambement ?

Un phénomène **auto-entretenu** (« réaction en chaîne ») :

1. Un léger décalage crée un bras de levier entre la force exercée et le milieu du poteau.
2. Ce bras de levier génère un moment
3. Moment \rightarrow rotation : le poteau fléchit
4. Le bras de levier augmente
5. Donc le moment augmente
6. ...
7. Le poteau casse



SOMMAIRE – S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. Échauffement 10'
2. Rappels 10'
3. Cours 50'
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique
4. Application 15'
5. Bilan 5'

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- Présentation
- Introduction
- Approche analytique**
- Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT

Formulation de la **Force Critique d'Euler**

Leonhard Euler (1707-1783, mathématicien et physicien suisse)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2}$$



- **E** est le **module de Young** et ne dépend que du matériau (« raideur » du matériau : quantifie l'allongement d'un matériau en fonction de la force appliquée)
- **I** est le **moment quadratique** (aussi appelé par abus de langage « inertie ») et ne dépend que de la section de l'élément : elle quantifie à la fois la **quantité de matière** que la **façon dont elle est disposée dans la section**.
- **l_f** est la longueur de flambement

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. **Approche analytique**
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT

Si la force de compression dépasse la **Force Critique d'Euler...** c'est le **flambement !**



Exemples de sun kink d'après un rapport du National Transportation Library. Credit: US D.O.T.

15 août 1974 - Déraillement du Charleroi-Bruxelles sur un pont à Luttre dû à une probable déformation par flambement d'un rail du pont à cause de la canicule. 18 morts et 60 blessés.

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. **Approche analytique**
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

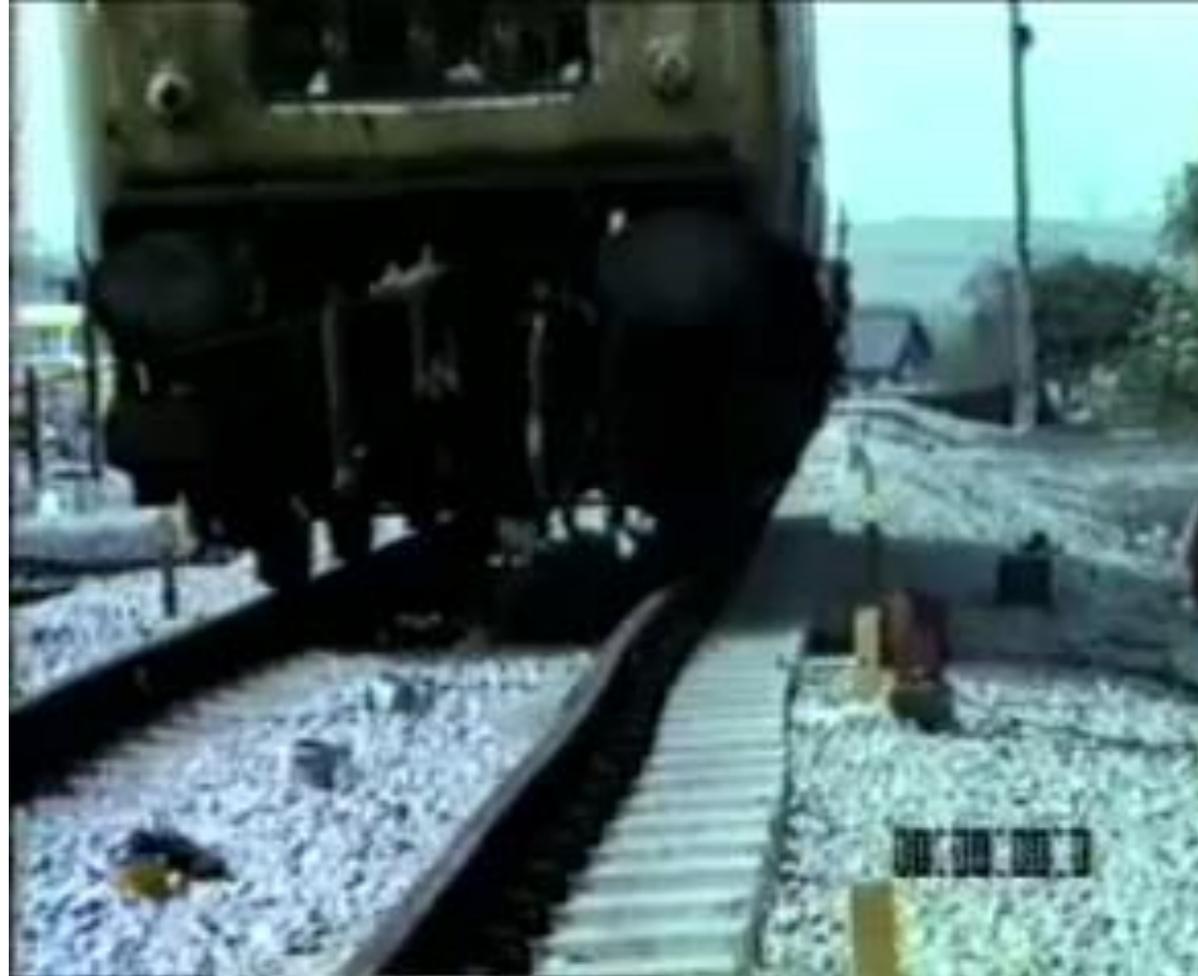
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT

Si la force de compression dépasse la **Force Critique d'Euler**... c'est le **flambement** !



Vidéo de *sun kink* : <https://www.youtube.com/watch?v=pszHRicuUlw>

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. **Approche analytique**
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT

Si la force de compression dépasse la **Force Critique d'Euler...** c'est le **flambement !**



Flambement d'une passerelle piétonne sur la rivière Avon à Christchurch (l'augmentation de la charge axiale de compression est due à un glissement de terrain qui provoqua le déplacement de la culée).

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. **Approche analytique**
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

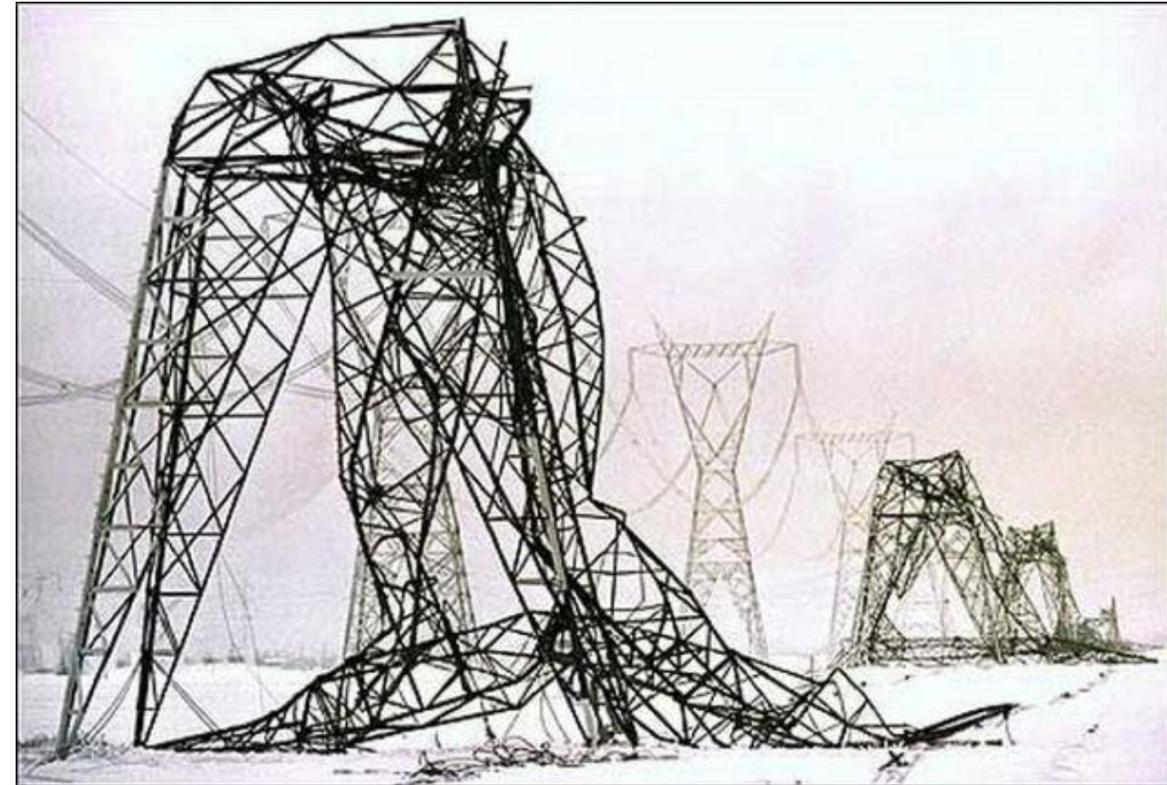
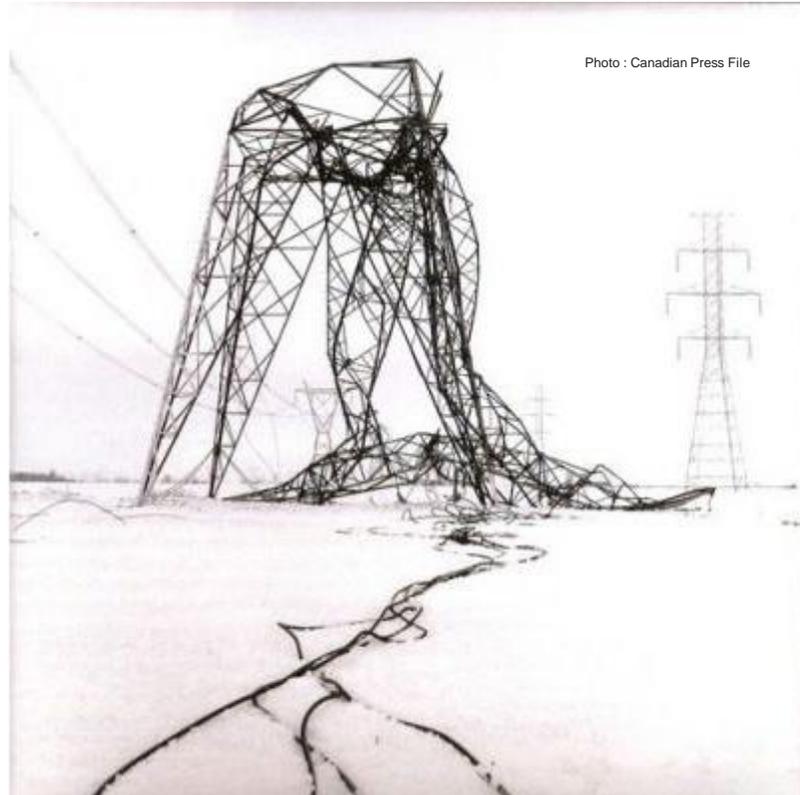
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT

Si la force de compression dépasse la **Force Critique d'Euler**... c'est le **flambement** !



Flambement des pylônes électriques lors de la tempête de glace de 1998 en Ontario, au Québec et en Nouvelle-Angleterre (la densité de la glace provoque une augmentation très importante et imprévue de la charge sur les pylônes).

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. **Approche analytique**
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

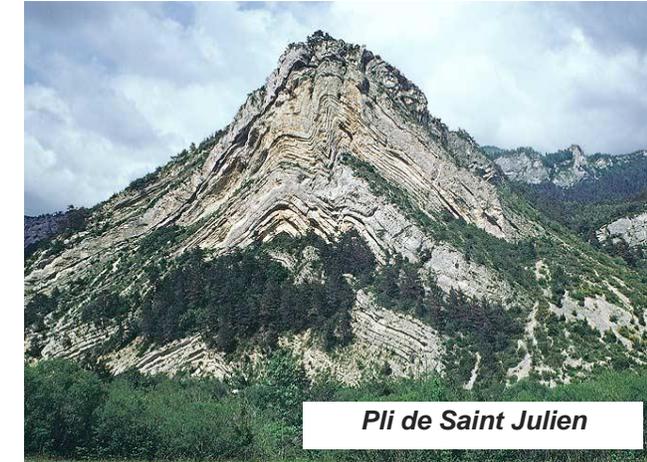
3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT

Si la force de compression dépasse la **Force Critique d'Euler...** c'est le **flambement !**



Roches plissées avec une succession d'anticlinaux et de synclinaux. Nouveau Mexique.
<http://www.fossilraptor.be/geomorphologie1.htm>



Pli de Saint Julien

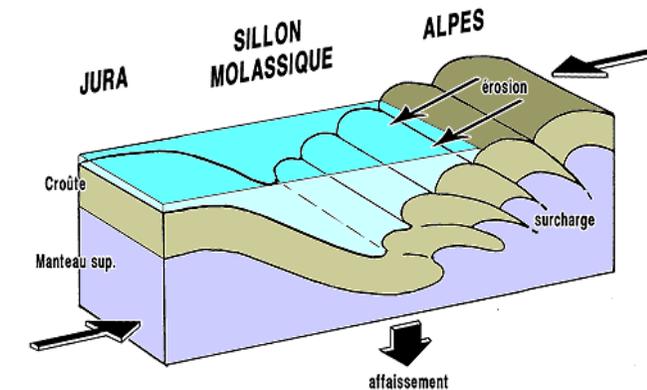


Schéma théorique très simplifié de la formation du sillon molassique périalpin

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : IMPACT DE L'ÉLANCEMENT

Observons la force critique d'Euler.

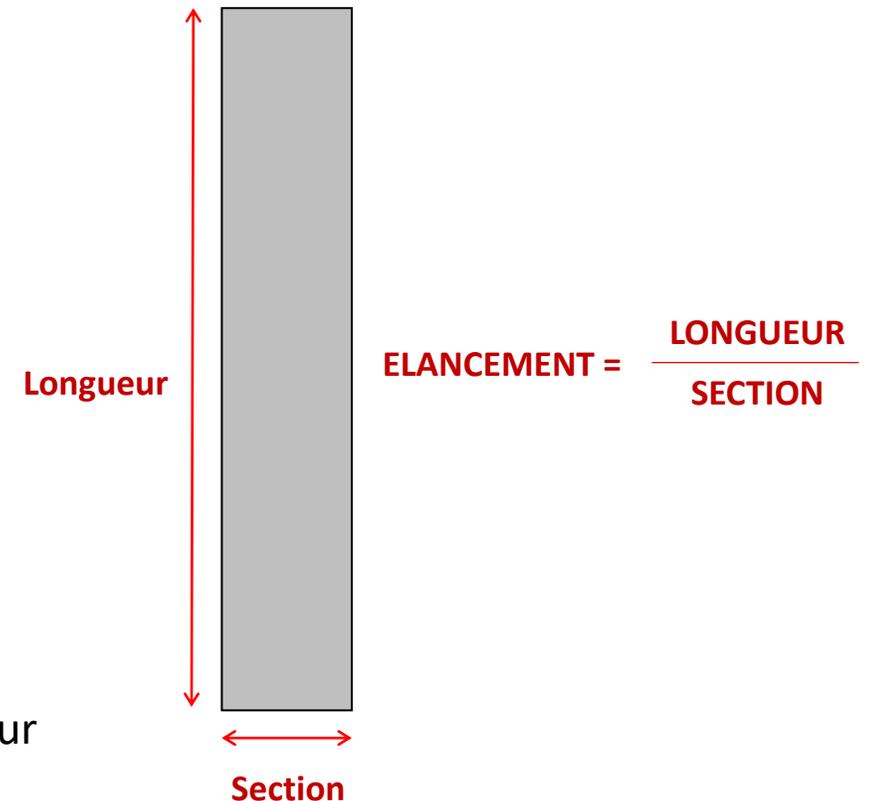
$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2}$$

On remarque qu'on peut influencer sur le risque de flambement en modifiant l'élançement de l'élément considéré.

L'élançement c'est le rapport de la section sur la longueur de l'élément.

Dire que le flambement est directement lié à l'élançement est une interprétation vraie mais simplifiée de la formule d'Euler :

- l'inertie est liée à la section
- la longueur de flambement est liée à la longueur



1. Échauffement 10'
2. Rappels 10'
3. Cours 50'
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique
4. Application 15'
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : IMPACT DE L'ÉLANCEMENT

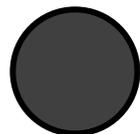
En augmentant l'inertie, on diminue l'élanement donc on augmente la force critique.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2}$$

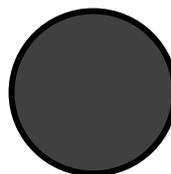
L'inertie est liée à

- La section : si la section augmente, l'inertie augmente
- La façon dont la matière est répartie : si la matière est répartie loin du centre de la section, l'inertie augmente

BIEN : augmenter la section



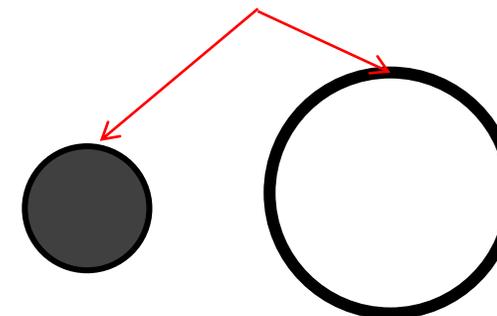
PEU EFFICACE
Contre le
flambement



PLUS EFFICACE
Contre le
flambement

MIEUX : jouer sur la répartition de la matière

Même quantité de matière



PEU EFFICACE
Contre le
flambement

TRÈS EFFICACE
Contre le
flambement

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. **Approche analytique**
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

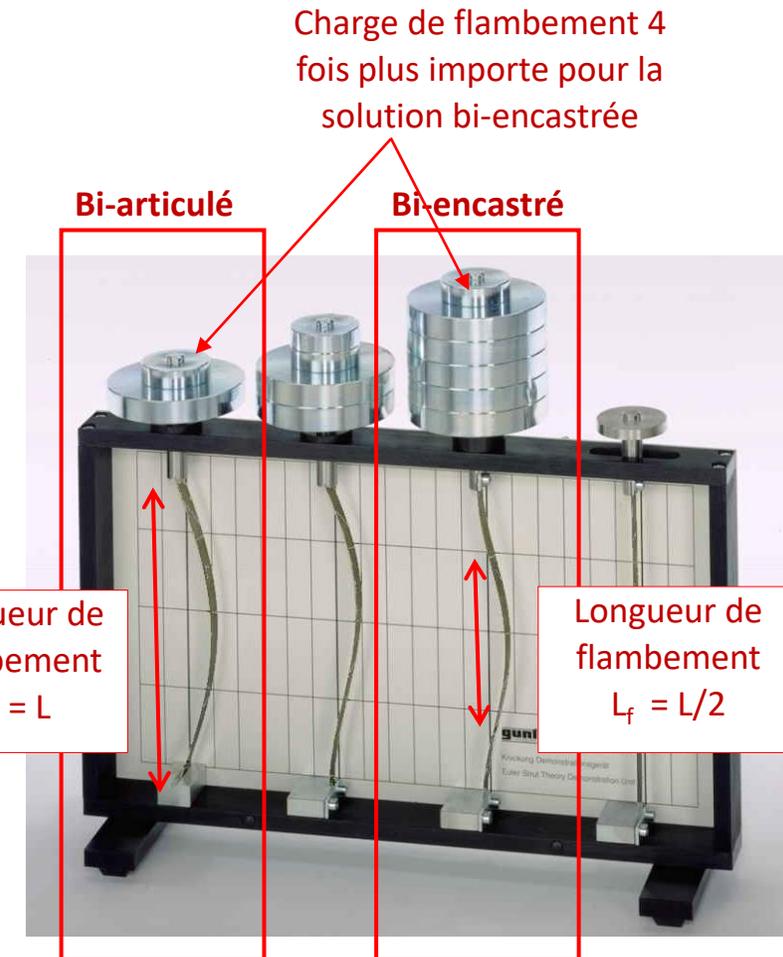
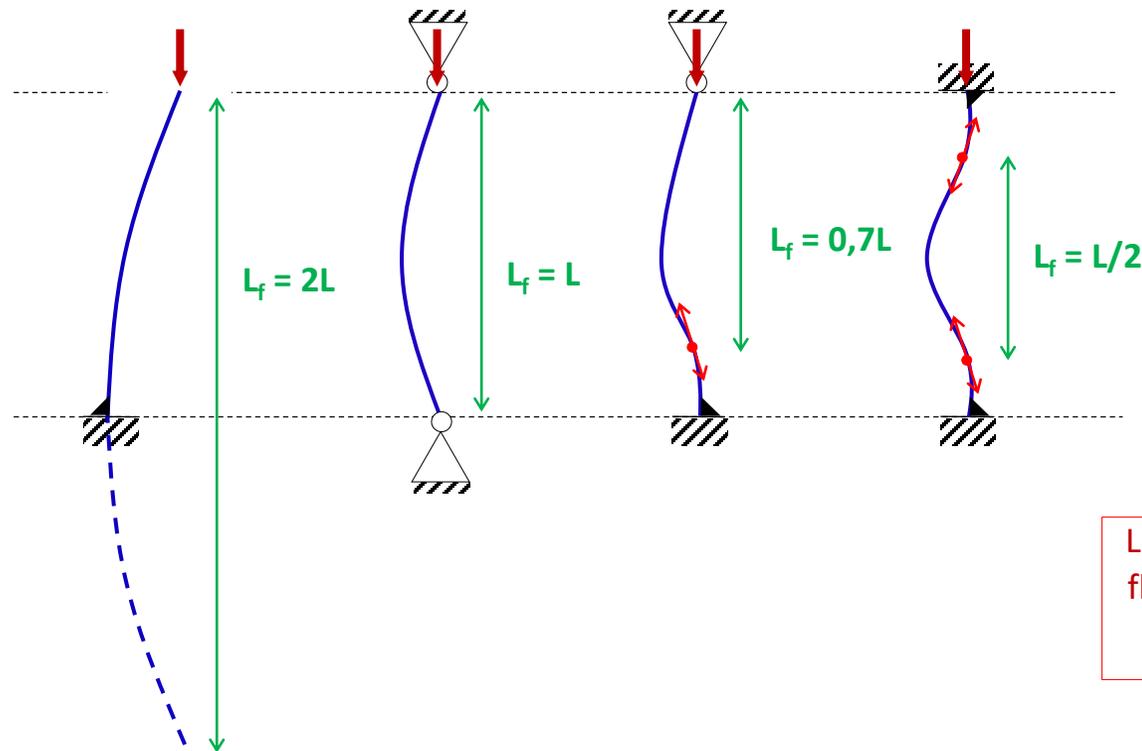
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : IMPACT DE L'ÉLANCEMENT

La longueur de flambement dépend du type de liaisons et d'appuis: différente de la longueur de l'élément, il s'agit de **la longueur sur laquelle la flexion peut se développer**



1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. **Approche analytique**
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : IMPACT DE L'ÉLANCEMENT

Réduire la longueur de flambement permet donc d'augmenter la force critique par un facteur « au carré » (Si je réduis L_f de 2, N_{cr} diminue de 4)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2}$$

Encastrer les poteaux en tête ($L_f = 0,7 L$)



Ajouter des raidisseurs



1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

a. Présentation

b. Introduction

c. Approche analytique

d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

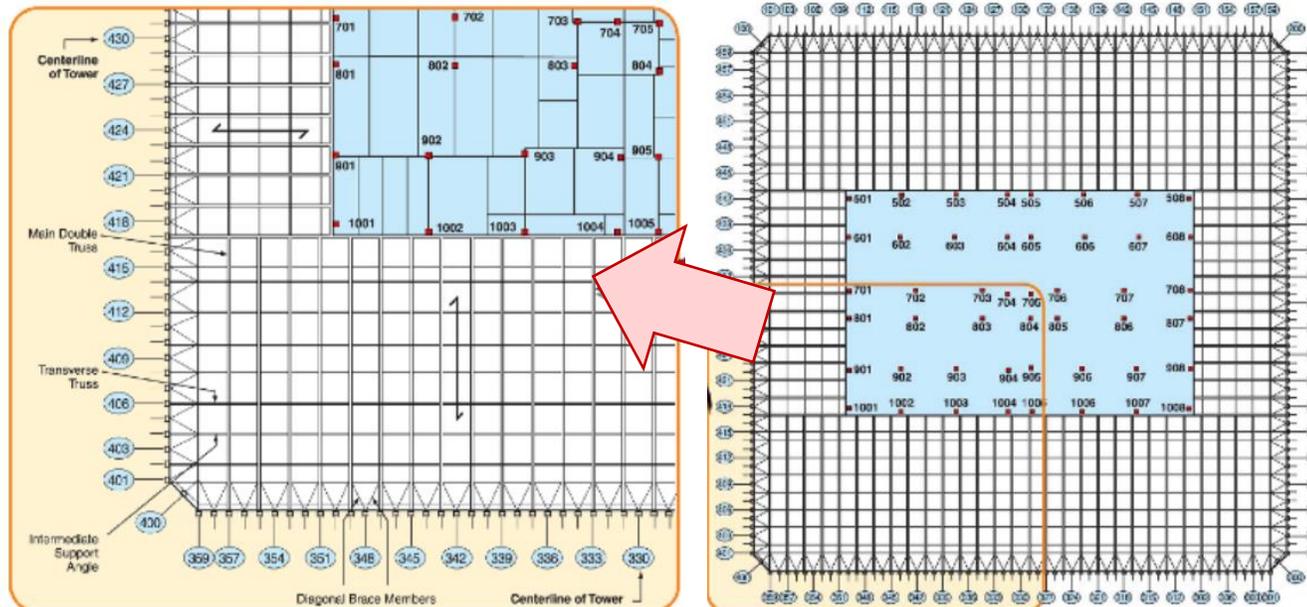
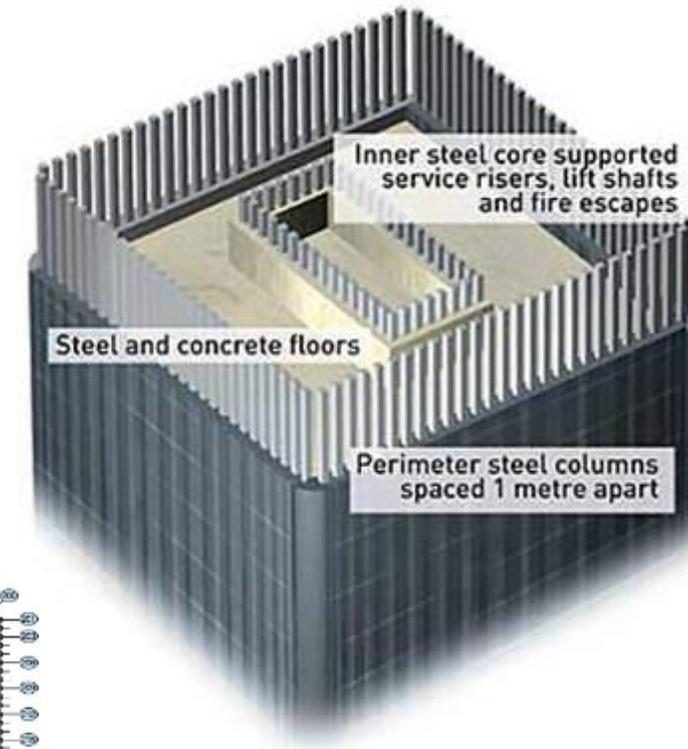
S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT

Exemple du World Trade Center

- Achievées en 1972 (tour nord) et 1973 (tour sud)
- 415 mètres de haut (110 étages)
- surface au sol de 4000 m² (plan carré de 63,5 mètres de côté)
- « noyau » formé par un réseau poteau-poutres en acier
- façades réalisées par des portiques en acier
- Planchers : dalles de 10cm supportés par des poutres treillis



1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. **Approche analytique**
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

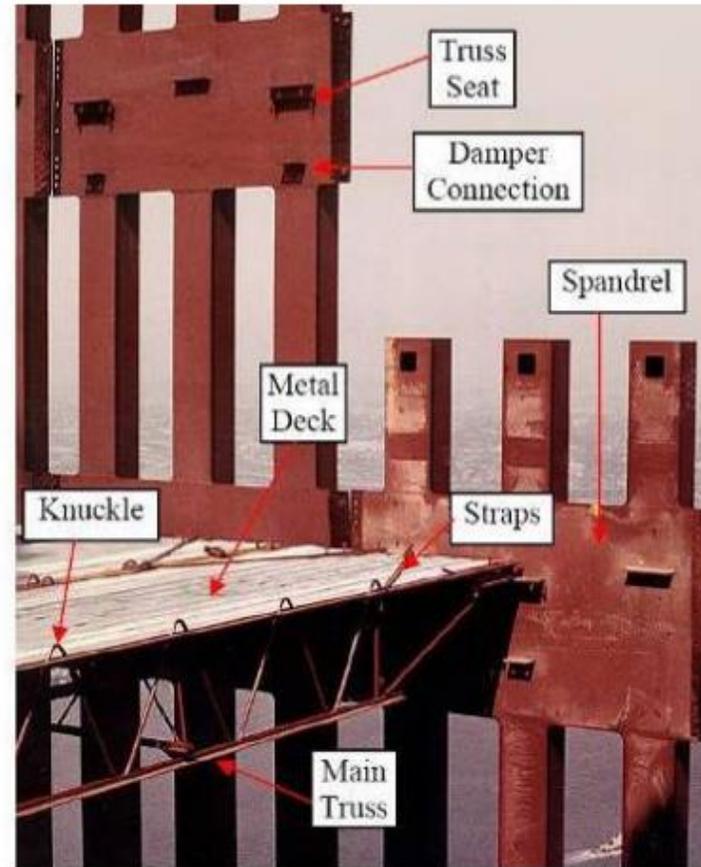
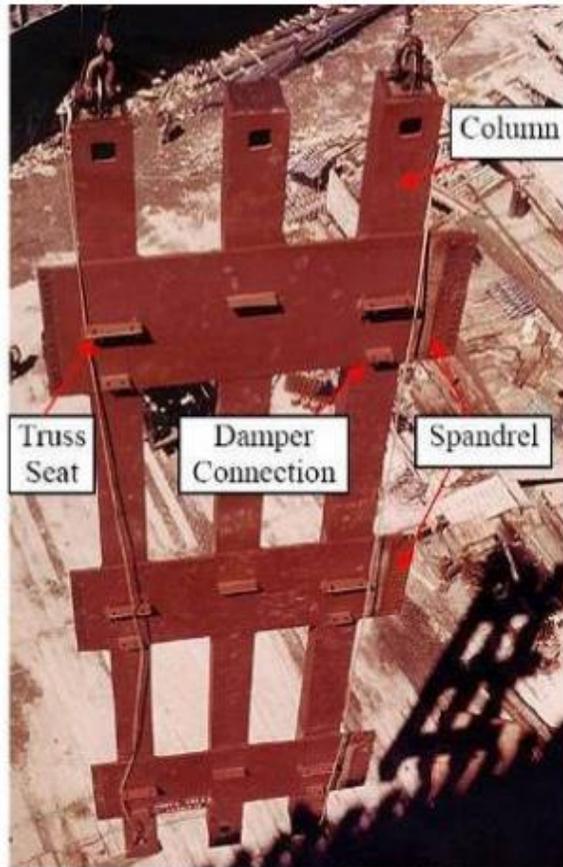
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT

Exemple du World Trade Center



Source: Unknown. Enhanced by NIST.



1. Échauffement 10'
2. Rappels 10'
3. Cours 50'
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. **Approche analytique**
 - d. Approche énergétique
4. Application 15'
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT

Exemple du World Trade Center

11 septembre 2001, à 8 h 43 et à 09 h 01 : l'attentat à l'avion

De nombreux poteaux ont été sectionnés mais le degré d'**hyperstaticité** est suffisant pour reporter la charge sur les poteaux intacts sans mettre en péril la stabilité des tours : elles résistent **environ 1 heure**.



SOMMAIRE – S1-C7 LE FLAMBEMENT

- 1. Échauffement 10'
- 2. Rappels 10'
- 3. Cours 50'
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. **Approche analytique**
 - d. Approche énergétique
- 4. Application 15'
- 5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

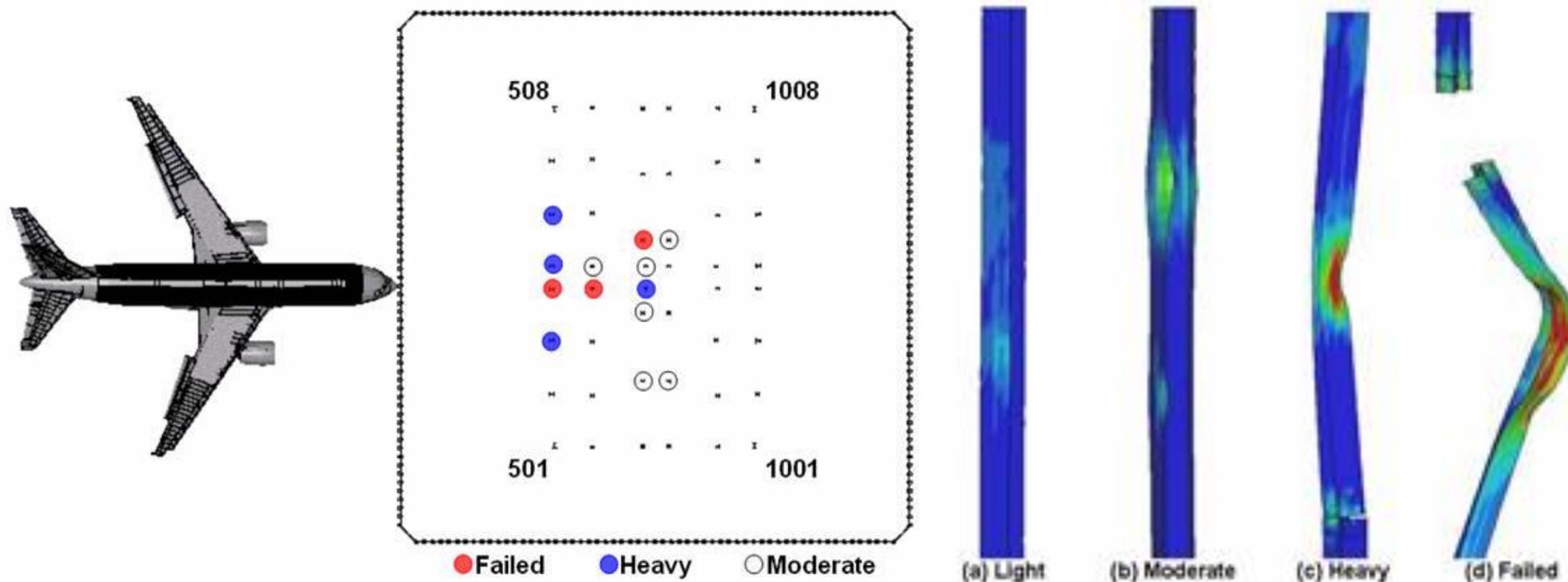
3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT

Exemple du World Trade Center

11 septembre 2001, à 8 h 43 et à 09 h 01 : l'attentat à l'avion

De nombreux poteaux ont été sectionnés mais le degré d'hyperstaticité est suffisant pour reporter la charge sur les poteaux intacts sans mettre en péril la stabilité des tours : elles résistent environ 1 heure.



S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT

Exemple du World Trade Center

Un incendie se déclare à l'intérieur de la structure.

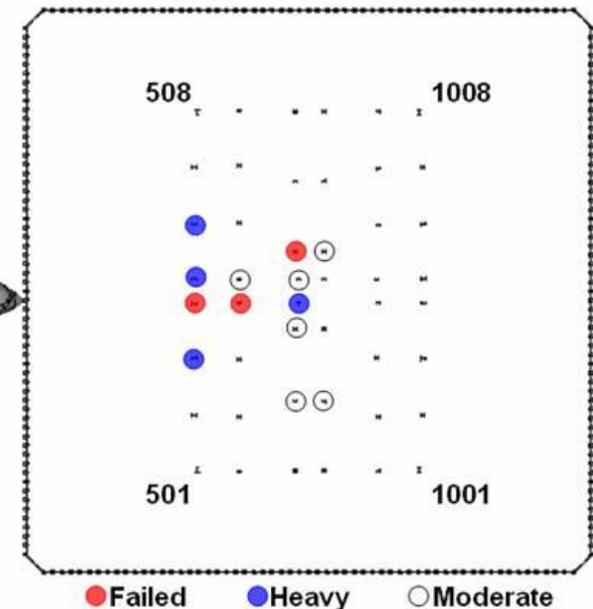
La cause principale du déclenchement de l'effondrement : le flambement des poteaux.

Pour une charge de compression au-delà de la force critique N_{cr} , les poteaux flambent :

$$N > N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2} \rightarrow \text{FLAMBEMENT} = \text{EFFONDREMENT}$$

Plusieurs phénomènes se conjuguent pour augmenter le risque de flambement :

- De nombreux poteaux et une partie du cœur de la tour sont endommagés, reportant la charge sur les autres, **augmentant ainsi la charge** qu'ils devaient reprendre et **les rapprochant de la charge critique de flambement**.



$$N < ? N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2} : N \uparrow$$

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT

Exemple du World Trade Center

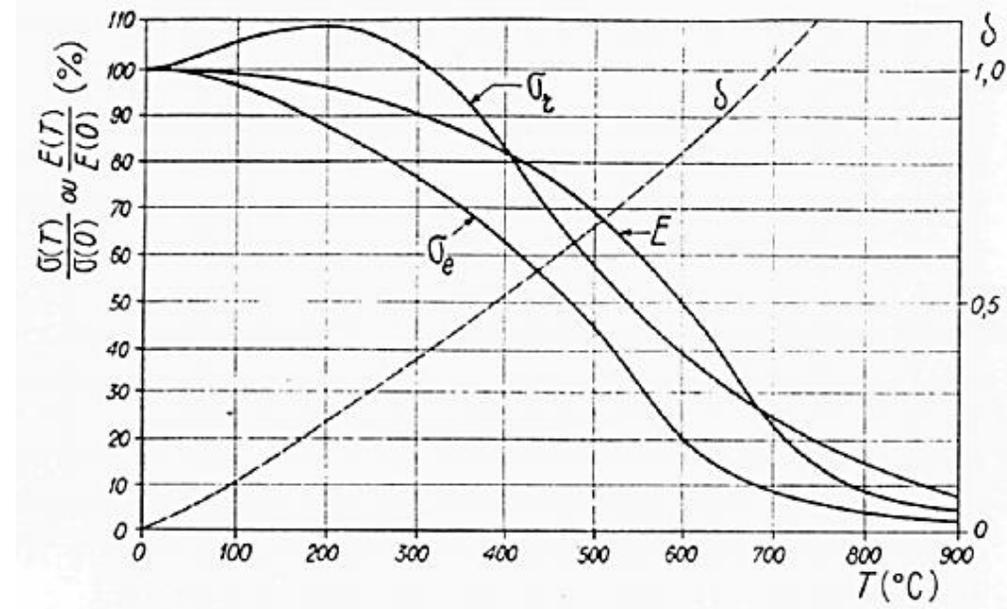
$$N > N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2} \rightarrow \text{FLAMBEMENT} = \text{EFFONDREMENT}$$

Plusieurs phénomènes se conjuguent pour augmenter le risque de flambement :

- La température augmente jusqu'à 600 à 800°C. Effet immédiat : réduction du module d'Young de l'acier des colonnes de 60 à 90%.

Or la force critique est proportionnelle au Module d'Young : si ce dernier diminue, elle diminue dans les mêmes proportions.

$$N < ? N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2} : E \downarrow \text{ implique } N_{cr} \downarrow$$



Module d'Young en de l'acier en fonction de la température

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT

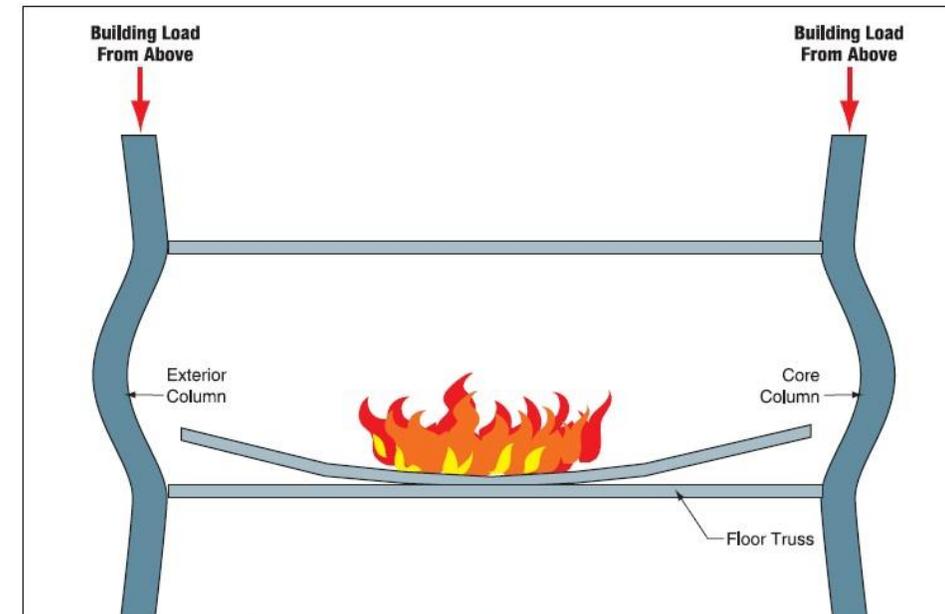
Exemple du World Trade Center

$$N > N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2} \rightarrow \text{FLAMBEMENT} = \text{EFFONDREMENT}$$

Plusieurs phénomènes se conjuguent pour augmenter le risque de flambement :

- La dilatation sous l'effet de la température des poutres treillis des planchers qui « poussent » sur les colonnes vers l'extérieur induisant une **perturbation**

une force qui induit un déplacement latéral non voulu sur le poteau
→ Bras de levier
→ moment
→ flexion parasite



Buckling of columns initiated by failure of floor framing and connections.

SOMMAIRE – S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

a. Présentation

b. Introduction

c. **Approche analytique**

d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT

Exemple du World Trade Center

$$N > N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2} \rightarrow \text{FLAMBEMENT} = \text{EFFONDREMENT}$$

Plusieurs phénomènes se conjuguent pour augmenter le risque de flambement :

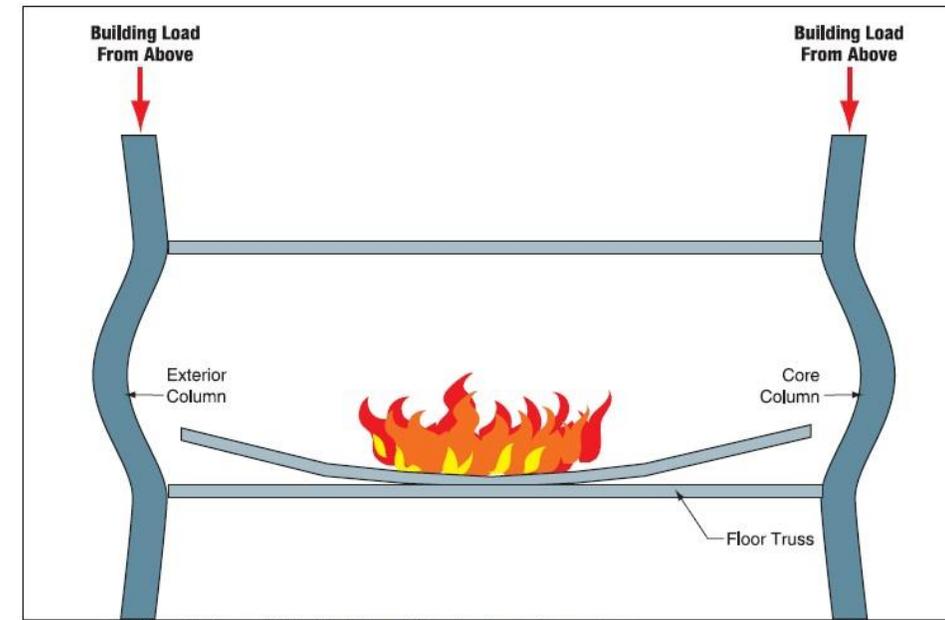
- Mais le phénomène considéré comme crucial a été l'augmentation subite de la longueur de flambement des poteaux consécutive à l'effondrement local des planchers.

Sous l'effet température, les liaisons de certains planchers se rompent, provoquant l'effondrement du plancher à l'intérieur de la structure.

Les poteaux qui avaient une longueur de flambement de 1 étage portent alors sur 2 étages.

La longueur de flambement est ainsi multipliée par 2 : la force critique **divisée par 4** !

$$N > N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2} : L_f \downarrow \text{ implique } N_{cr} \downarrow^2$$



Buckling of columns initiated by failure of floor framing and connections.

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

a. Présentation

b. Introduction

c. Approche analytique

d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.c. Approche analytique

APPROCHE ANALYTIQUE DU FLAMBEMENT : LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT

Exemple du World Trade Center

$$N > N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2} \rightarrow \text{FLAMBEMENT} = \text{EFFONDREMENT}$$

Plusieurs phénomènes se conjuguent pour augmenter le risque de flambement :

- Mais le phénomène considéré comme crucial a été l'augmentation subite de la longueur de flambement des poteaux consécutive à l'effondrement local des planchers.



S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.d. Approche énergétique

APPROCHE ÉNERGÉTIQUE DU FLAMBEMENT

Pour comprendre les types d'équilibre, faisons une analogie avec une bille :

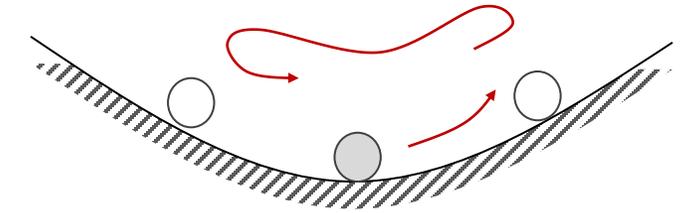
L'état d'un système est représenté par une bille sur un support.

Cette bille peut connaître deux types d'équilibre :

- **Equilibre stable:**

Perturbation → le système retrouve sa position initiale
→ Oscillations limitées.

Imaginons la bille dans une vallée.

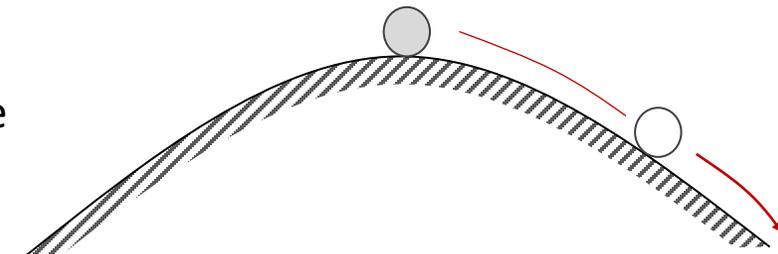


Etat stable

- **Equilibre instable.**

Perturbation → le système s'éloigne de sa position initiale
→ grands déplacements

Imaginons la bille est en haut d'une colline



Etat instable

SOMMAIRE – S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- Présentation
- Introduction
- Approche analytique
- Approche énergétique**

4. Application 15'

5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

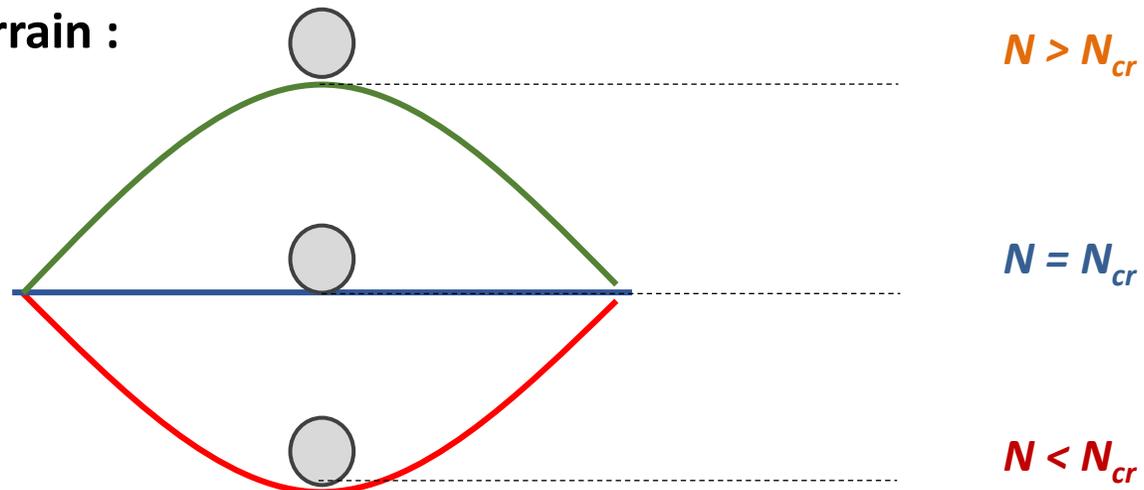
3.d. Approche énergétique

APPROCHE ÉNERGÉTIQUE DU FLAMBEMENT

Maintenant, imaginons que le poteau mis en compression par une force N est comme une bille posée sur un support :

- la bille symbolise le poteau
- son déplacement par rapport à sa position initiale fait référence à la déflexion du poteau soumis à une perturbation horizontale.
- La force de compression détermine l'altitude du terrain : il existe une force, appelée **force critique N_{cr}** pour laquelle le terrain est plat. Si la force N du système est inférieure à la force critique, alors le terrain est creux. Si elle est supérieure, il sera en revanche bombé.

Forme du terrain :



S1-C7 LE FLAMBEMENT

3.d. Approche énergétique

APPROCHE ÉNERGÉTIQUE DU FLAMBEMENT

Pour notre poteau, il y a 3 configurations possibles en fonction de la force N de compression :

- Si on pousse faiblement $N < N_{cr}$: état d'équilibre stable

Après déflexion forcée, le poteau dans sa position initiale lorsque la perturbation s'arrête.

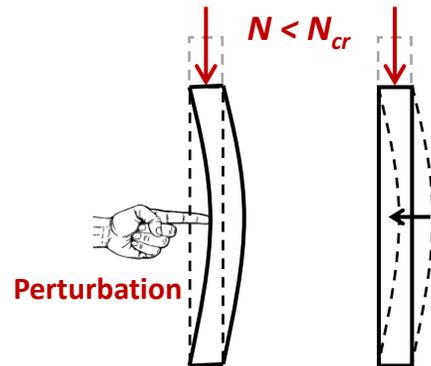
- Si on pousse avec une force $N = N_{cr}$: la position fléchie devient un autre équilibre possible.

Après déflexion forcée, celle-ci restera inchangée même après disparition de la perturbation.

- Si on pousse fortement $N > N_{cr}$: équilibre du poteau instable

La déflexion continuera à s'accroître de façon incontrôlable : c'est le **flambement**.

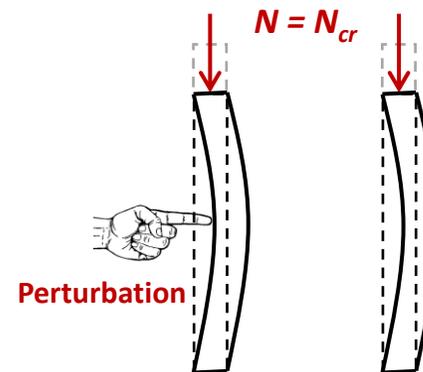
$N < N_{cr}$: Equilibre stable



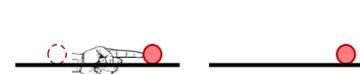
Le système revient à sa position initiale lorsque la perturbation s'arrête.



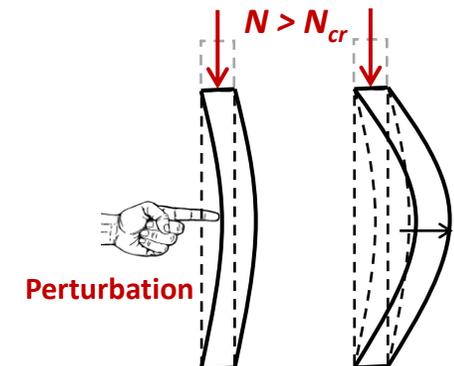
$N = N_{cr}$: Equilibre métastable



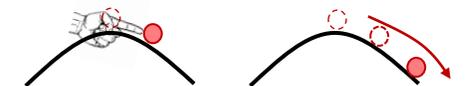
Le système garde la déformation lorsque la perturbation s'arrête.



$N > N_{cr}$: Equilibre instable = **FLAMBEMENT**



La déformation s'accroît rapidement et sans limite (hormis la rupture)



1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

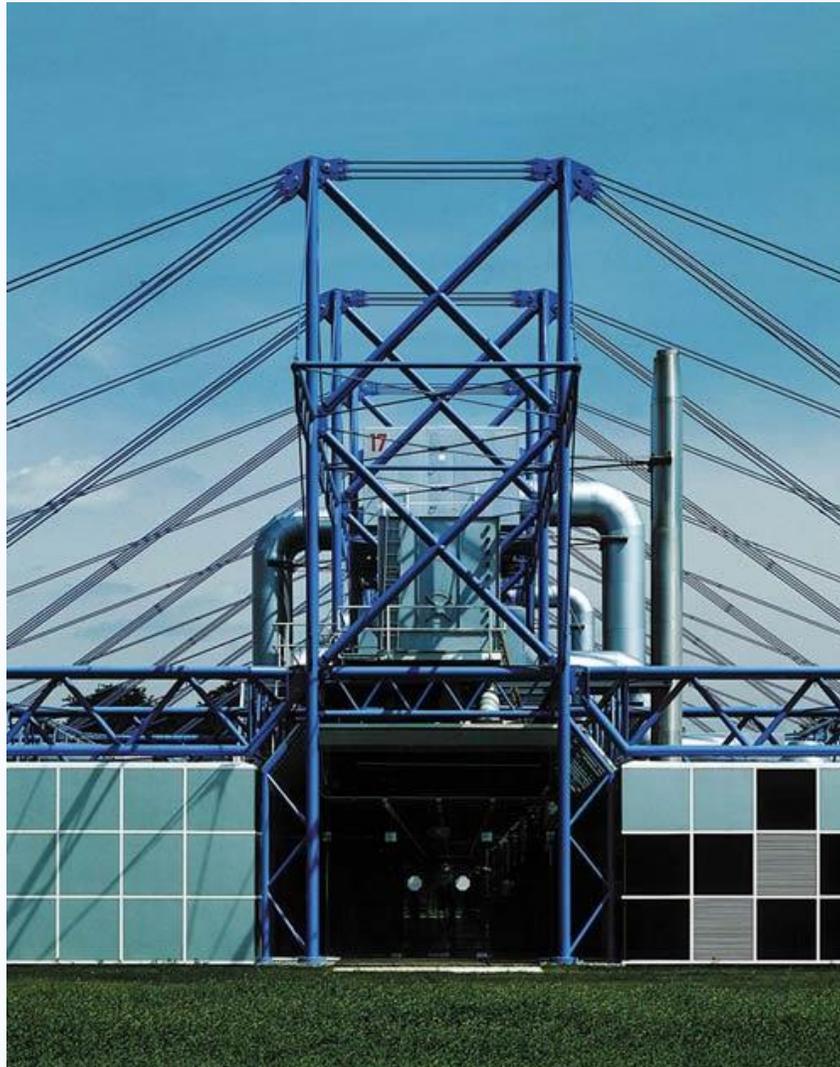
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Vues de l'extérieur :



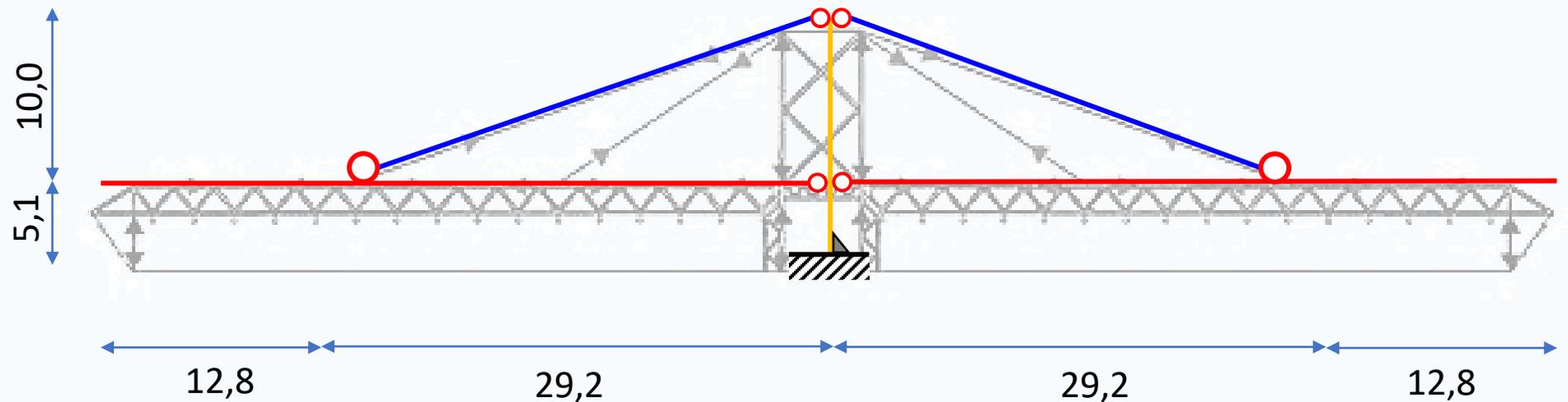
1. Échauffement 10'
2. Rappels 10'
3. Cours 50'
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique
4. Application 15'
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau



S1-C7 LE FLAMBEMENT

4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

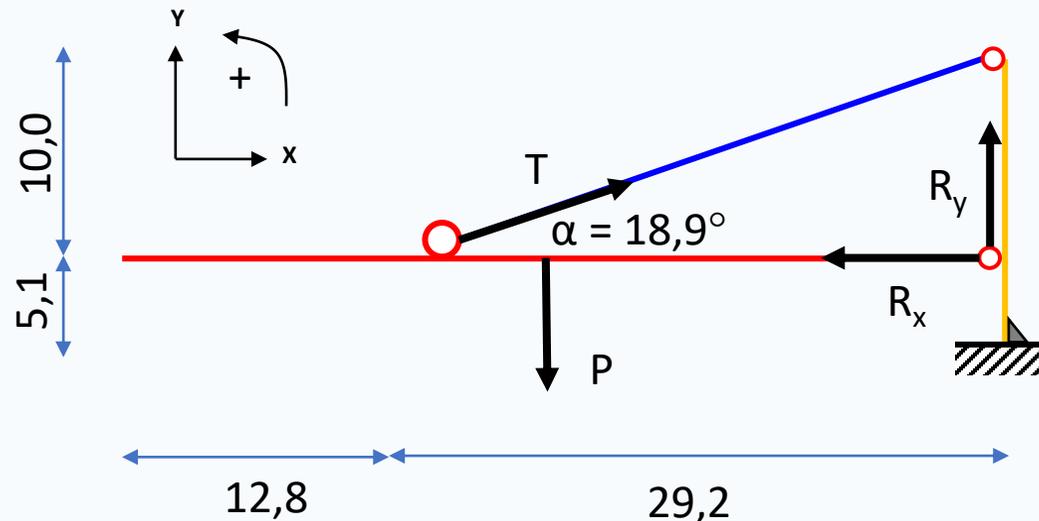
Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau

On avait calculé que :

$T = 4\,567$ kN (force de traction dans le câble)

$R_x = 4\,320$ kN (force de compression dans la poutre)

$R_y = 575$ kN (force de réaction d'appui de la poutre sur le poteau)



1. Échauffement 10'

2. Rappels 10'

3. Cours 50'

- a. Présentation
- b. Introduction
- c. Approche analytique
- d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

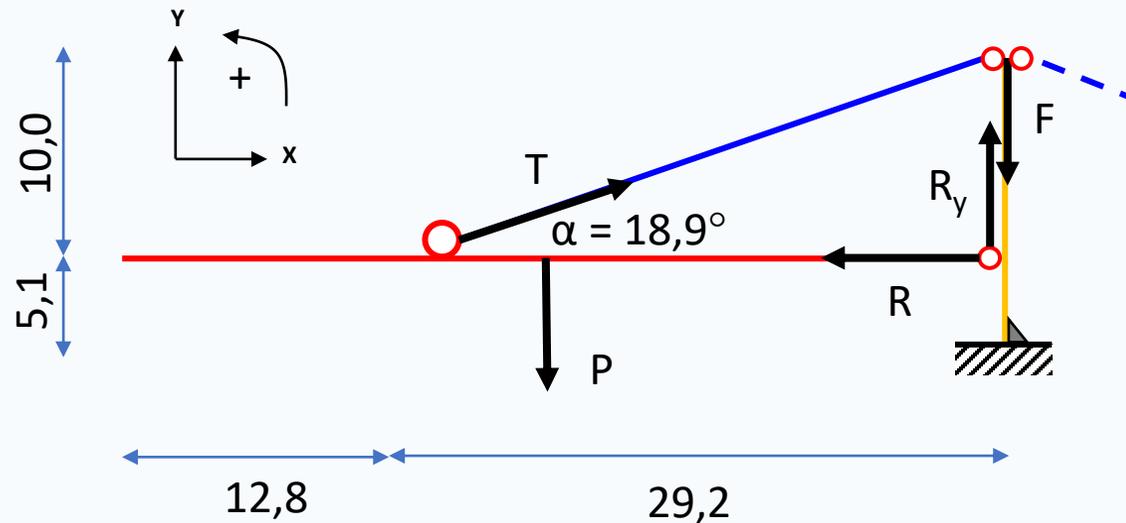
S1-C7 LE FLAMBEMENT

4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau

On cherche F : attention, de l'autre côté du poteau, il y a le deuxième câble à ne pas oublier !

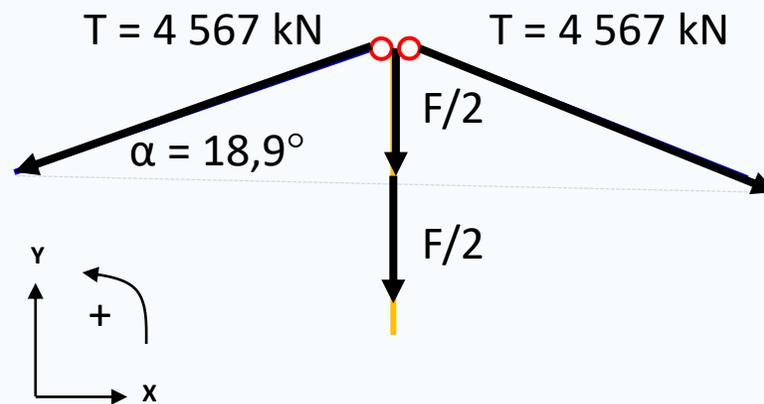


S1-C7 LE FLAMBEMENT

4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau



On décompose le vecteur représentant la traction du câble afin d'en extraire la composante verticale

$$\sin(\alpha) = \frac{F/2}{4567} = 0,323$$

$F/2 = 4567 \times 0,323 = 1475 \text{ kN}$
 $F = 2950 \text{ kN}$ (Force de compression dans la partie haute du poteau)

SOMMAIRE – S1-C7 LE FLAMBEMENT

1. Échauffement 10'
2. Rappels 10'
3. Cours 50'
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique

4. Application 15'

5. Bilan 5'

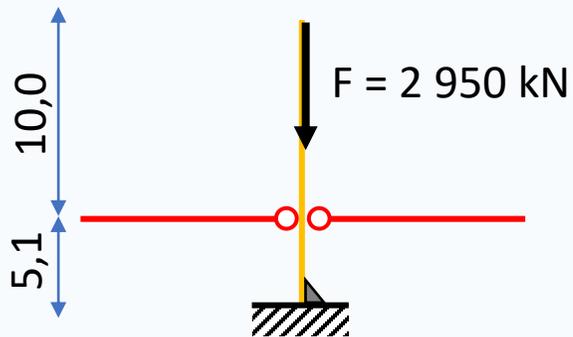
1. Échauffement 10'
2. Rappels 10'
3. Cours 50'
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique
4. Application 15'
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau



Partie haute du poteau

On a donc un poteau encasturé-rotulé de 10 mètres de haut (la toiture ajoute une raideur qu'on assimile à un encastrement et la symétrie de la structure empêche les mouvements horizontaux en partie haute), chargée par une force de compression de 2 950 kN.

Section nécessaire à la compression simple :

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq 235 \text{ MPa}$$

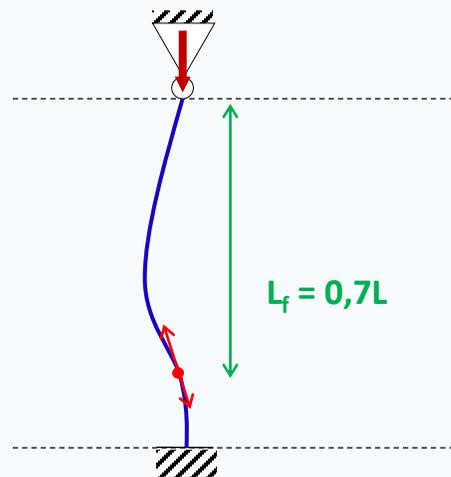
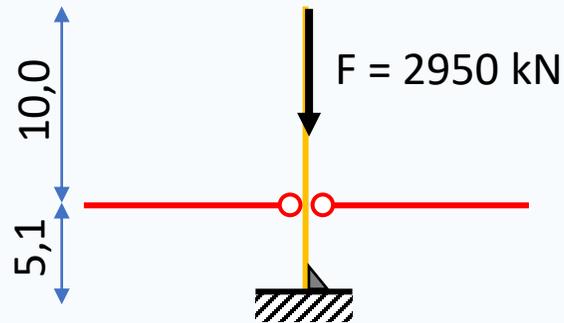
$$S \geq \frac{2\,950\,000 \text{ N}}{235 \text{ N/mm}^2} = 12\,554 \text{ mm}^2 = \mathbf{126 \text{ cm}^2}$$

S1-C7 LE FLAMBEMENT

4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau



Maintenant qu'on a la section pour résister à la compression simple, il faut trouver l'inertie nécessaire pour lutter contre le flambement. On doit s'assurer que :

$$F = 2\,950 \text{ kN} < N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2}$$

Donc :

$$I > \frac{l_f^2 * F}{\pi^2 E} \quad \text{Avec} \begin{cases} E = 210\,000 \text{ MPa} \\ F = 2\,950 \text{ kN} \\ l_f = 0,7 * 10 = 7 \text{ m} \end{cases}$$

$$I > \frac{7000^2 * 2\,950\,000}{\pi^2 * 210\,000} \quad I > 6\,982 \text{ cm}^4$$

S1-C7 LE FLAMBEMENT

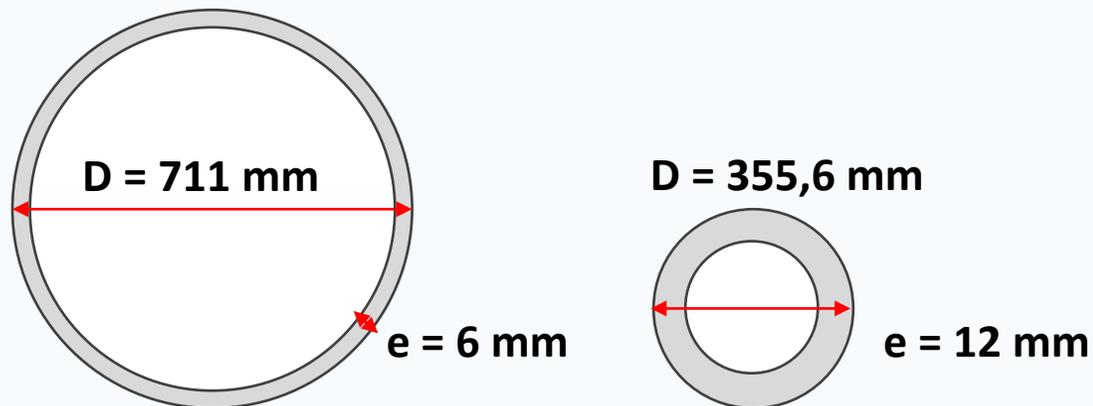
4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau

On ouvre un catalogue de profilé, comme ceux d'Arcelor

Mittal, et on cherche :
$$\begin{cases} S > 126 \text{ cm}^2 \\ I > 6\,982 \text{ cm}^4 \end{cases}$$



Sections les plus économiques, aspects architecturaux très différents : 355,6mm de diamètre pour 12mm d'épaisseur et 711mm de diamètre pour 6mm d'épaisseur

	D mm	e [mm]	S [cm ²]	I [cm ⁴]
CHSC355.6x12.0	355.60	12	130	19139
CHSC711x6.0	711	6	133	82568
CHSC457x10.0	457	10	140	35091
CHSH457x10.0	457	10	140	35091
CHSC762x6.0	762	6	143	101813
CHSC406.4x12.0	406.40	12	149	28937
CHSC610x8.0	610	8	151	68551
CHSC323.9x16.0	323.90	16	155	18390
CHSC508x10.0	508	10	156	48520
CHSH508x10.0	508	10	156	48520
CHSC457x12.0	457	12	168	41556
CHSC355.6x16.0	355.60	16	171	24663
CHSC711x8.0	711	8	177	109162
CHSC559x10.3	559	10.30	178	66843
CHSC508x12.0	508	12	187	57536
CHSC610x10.0	610	10	188	84847
CHSH610x10.0	610	10	188	84847
CHSC762x8.0	762	8	190	134683
CHSC559x11.1	559	11.10	191	71724
CHSC610x10.3	610	10.30	194	87262
CHSC406.4x16.0	406.40	16	196	37449
CHSC813x8.0	813	8	202	163901
CHSC559x11.9	559	11.90	205	76562
CHSC610x11.1	610	11.10	209	93669
CHSC660x10.3	660	10.30	210	110954
CHSC355.6x20.0	355.60	20	211	29792
CHSC711x10.0	711	10	220	135301
CHSH711x10.0	711	10	220	135301
CHSC457x16.0	457	16	222	53959
CHSC610x12.0	610	12	225	100814
CHSC660x11.1	660	11.10	226	119136

S1-C7 LE FLAMBEMENT

4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau

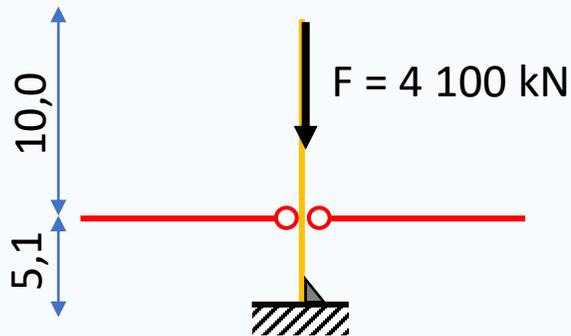
Partie basse du poteau

On a donc un poteau bi-encasté de 5.1 mètres de haut (la toiture ajoute une raideur qu'on assimile à un encastrement et le pied est encasté par définition), chargée par une force de compression de 2 950 kN + (575 (x2) des toitures, calculé lors de l'exercice précédent) = 4 100 kN

Section nécessaire à la compression simple :

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq 235 \text{ MPa}$$

$$S \geq \frac{4\,100\,000 \text{ N}}{235 \text{ N/mm}^2} = 17\,446 \text{ mm}^2 = 175 \text{ cm}^2$$

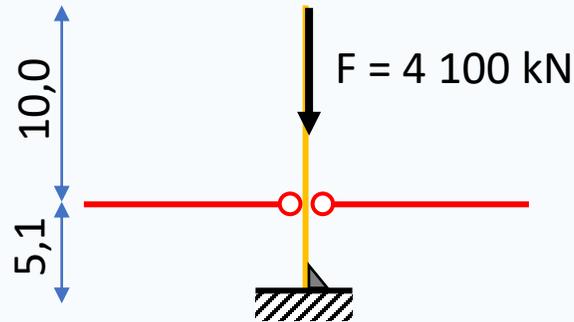


S1-C7 LE FLAMBEMENT

4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau



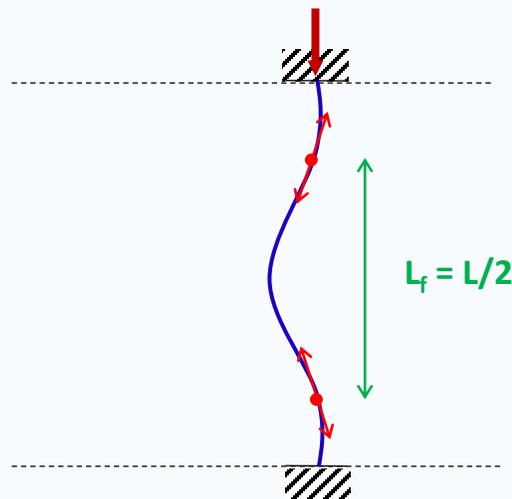
Maintenant qu'on a la section pour résister à la compression simple, il faut trouver l'inertie nécessaire pour lutter contre le flambement. On doit s'assurer que :

$$F = 4\,100\text{ kN} < N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2}$$

Donc :

$$I > \frac{l_f^2 * F}{\pi^2 E} \quad \text{Avec} \begin{cases} E = 210\,000\text{ MPa} \\ F = 4\,100\text{ kN} \\ l_f = 0,5 * 5,1 = 2,55\text{ m} \end{cases}$$

$$I > \frac{2550^2 * 4\,100\,000}{\pi^2 * 210\,000} \quad I > 1\,288\text{ cm}^4$$



SOMMAIRE – S1-C7
LE FLAMBEMENT

1. Échauffement 10'
2. Rappels 10'
3. Cours 50'
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique
4. Application 15'
5. Bilan 5'

S1-C7 LE FLAMBEMENT

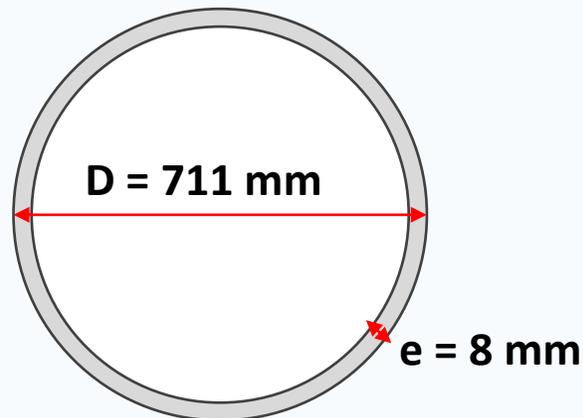
4. APPLICATION

ÉTUDE SIMPLIFIÉE DE L'USINE INMOS MICROPROCESSOR À NEWPORT

Question : Sur le schéma statique simplifié du cours S1-C7, calculer la section tubique du poteau

On ouvre un catalogue de profilé, comme ceux d'Arcelor

Mittal, et on cherche :
$$\begin{cases} S > 175 \text{ cm}^2 \\ I > 1\,288 \text{ cm}^4 \end{cases}$$



Je choisirai probablement un tube de diamètre 711mm et d'épaisseur 8mm pour l'ensemble du poteau.

	D mm	e [mm]	S [cm ²]	I [cm ⁴]
CHSC355.6x12.0	355.60	12	130	19139
CHSC711x6.0	711	6	133	82568
CHSC457x10.0	457	10	140	35091
CHSH457x10.0	457	10	140	35091
CHSC762x6.0	762	6	143	101813
CHSC406.4x12.0	406.40	12	149	28937
CHSC610x8.0	610	8	151	68551
CHSC323.9x16.0	323.90	16	155	18390
CHSC508x10.0	508	10	156	48520
CHSH508x10.0	508	10	156	48520
CHSC457x12.0	457	12	168	41556
CHSC355.6x16.0	355.60	16	171	24663
CHSC711x8.0	711	8	177	109162
CHSC559x10.3	559	10.30	178	66843
CHSC508x12.0	508	12	187	57536
CHSC610x10.0	610	10	188	84847
CHSH610x10.0	610	10	188	84847
CHSC762x8.0	762	8	190	134683
CHSC559x11.1	559	11.10	191	71724
CHSC610x10.3	610	10.30	194	87262
CHSC406.4x16.0	406.40	16	196	37449
CHSC813x8.0	813	8	202	163901
CHSC559x11.9	559	11.90	205	76562
CHSC610x11.1	610	11.10	209	93669
CHSC660x10.3	660	10.30	210	110954
CHSC355.6x20.0	355.60	20	211	29792
CHSC711x10.0	711	10	220	135301
CHSH711x10.0	711	10	220	135301
CHSC457x16.0	457	16	222	53959
CHSC610x12.0	610	12	225	100814
CHSC660x11.1	660	11.10	226	119136

1. Échauffement **10'**
2. Rappels **10'**
3. Cours **50'**
 - a. Présentation
 - b. Introduction
 - c. Approche analytique
 - d. Approche énergétique
4. Application **15'**
5. Bilan **5'**

Qu'a-t-on appris aujourd'hui?

À LA SEMAINE PROCHAINE !

One World Trade Center, New York

