

SEMINAIRE DE FORMATION

RISQUE BATIMENTAIRE

**CADRE: FORMATION DES OFFICIERS
SPECIALISTES RISQUE BATIMENTAIRE
DE DETACHEMENT FRANCAIS INSARAG**

SITE: ENTENTE ECASC VALABRE

JOUR 4

DOMMAGES AUX CONSTRUCTIONS METALLIQUES

INTERVENANT: JEAN-LUC REY

REVISION RB 2017 V0



SOMMAIRE

- 1 Contexte général**
- 2 Le matériau acier**
- 3 Comportement & Typologies des structures métalliques**
- 4 Dommages caractéristiques dus aux poussées H**
- 5 Autre cas de charge: Incendie**
- 6 Crédits images**

CONTEXTE GÉNÉRAL



COMPORTEMENT GENERAL DES STRUCTURES M. AUX POUSSEES HORIZONTALES (Séismes, vents,..)

- Excellent comportement en toutes zones sismiques
- Comportement Ductile et Dissipatif
- Les ossatures métalliques conviennent pour tous les types de bâtiment
- Condition particulière: Qualité des assemblages

LE MATERIAU ACIER

Définition:

alliage $Fe+C$ à teneur en carbone contrôlée ($\sim 0,02\%$) et utilisation générale dans le cadre des constructions métalliques de la gamme des S235 ($R_e = 235 \text{ Mpa}$)

Avantages des aciers pour la tenue aux séismes:

une très bonne ductilité naturelle : il est capable de subir une déformation importante avant de se rompre, sans dégradation dans sa constitution, sans détérioration de sa résistance et de sa rigidité ;

- une grande capacité d'absorption d'énergie : c'est le comportement ductile de l'acier qui favorise la dissipation de l'énergie ;

- un rapport résistance/masse volumique élevé (performance);

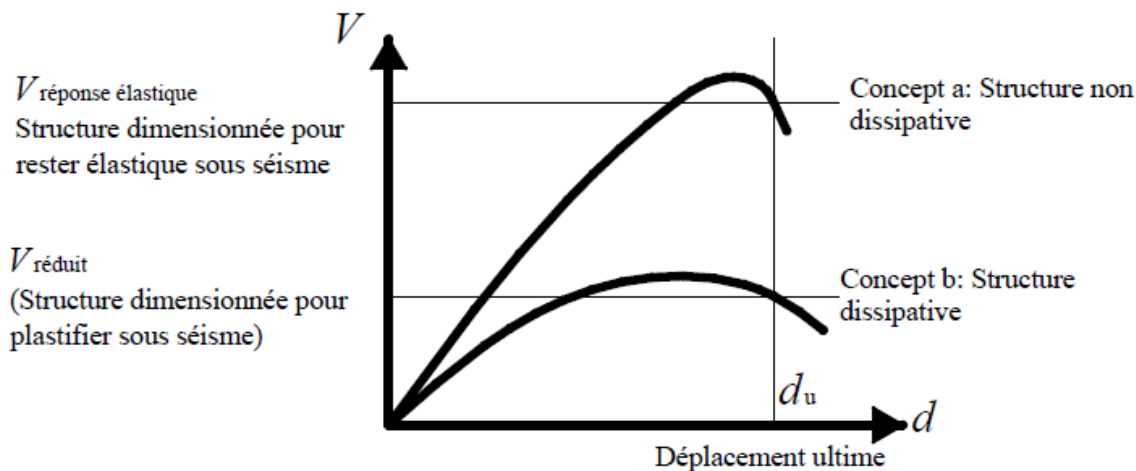
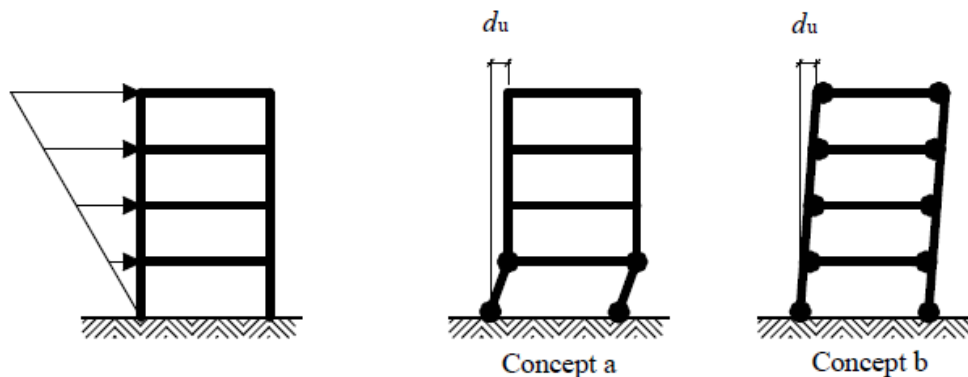
- une résistance mécanique élevée à la traction, à la compression et au cisaillement ;

- une bonne tenue en fatigue : capacité de l'acier à supporter un grand nombre de cycles et de charges avant rupture ;

- facilité de mise en oeuvre d'assemblages à la fois rigides, résistants et ductiles.

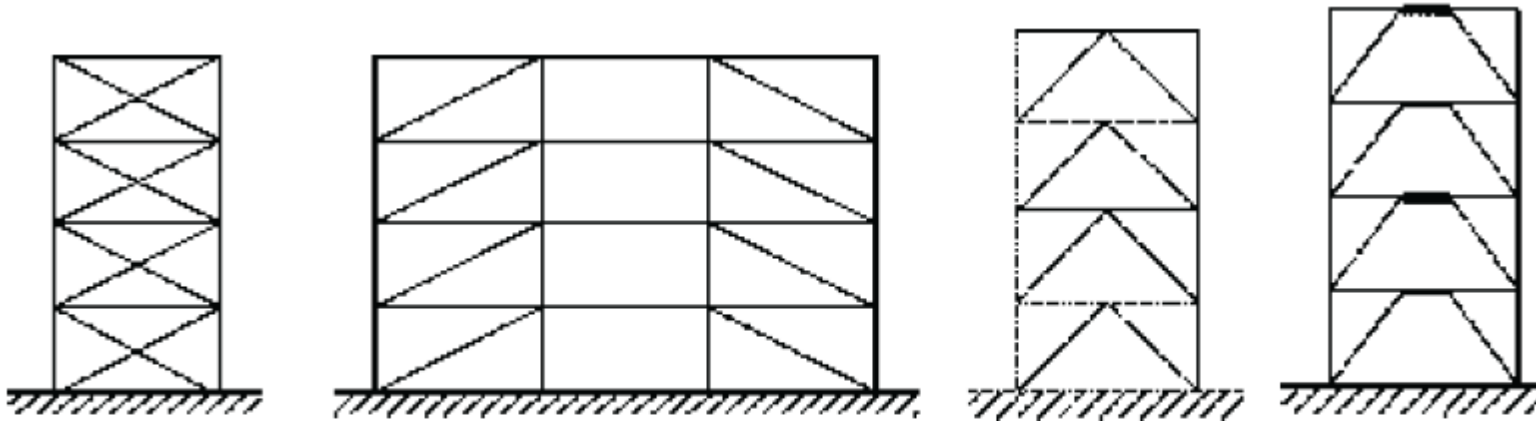
COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

Exemple de comportement global de structure dissipatif et non dissipatif. La structure non dissipative s'effondre dans un mécanisme n'impliquant qu'un seul étage.

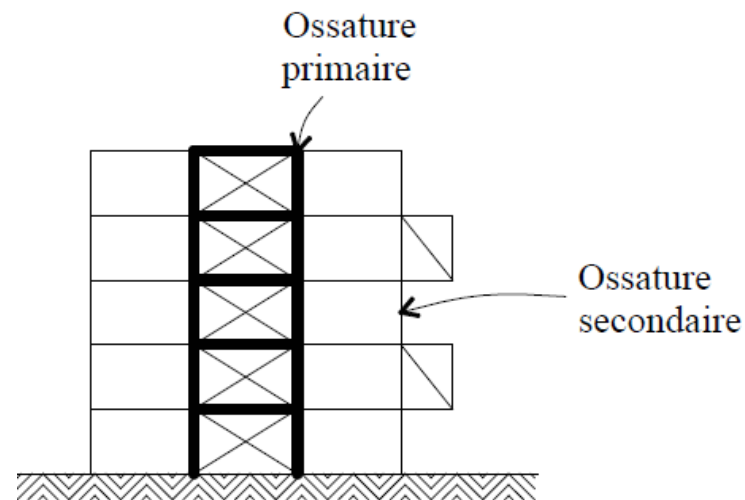


COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

A l'échelle de la structure

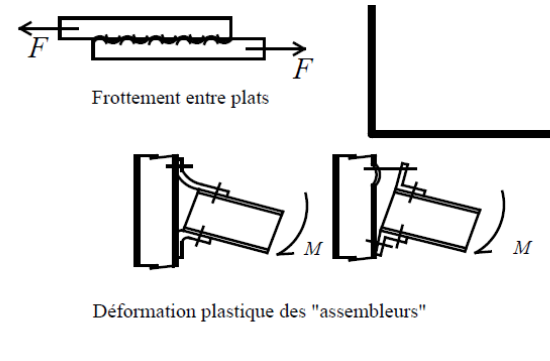
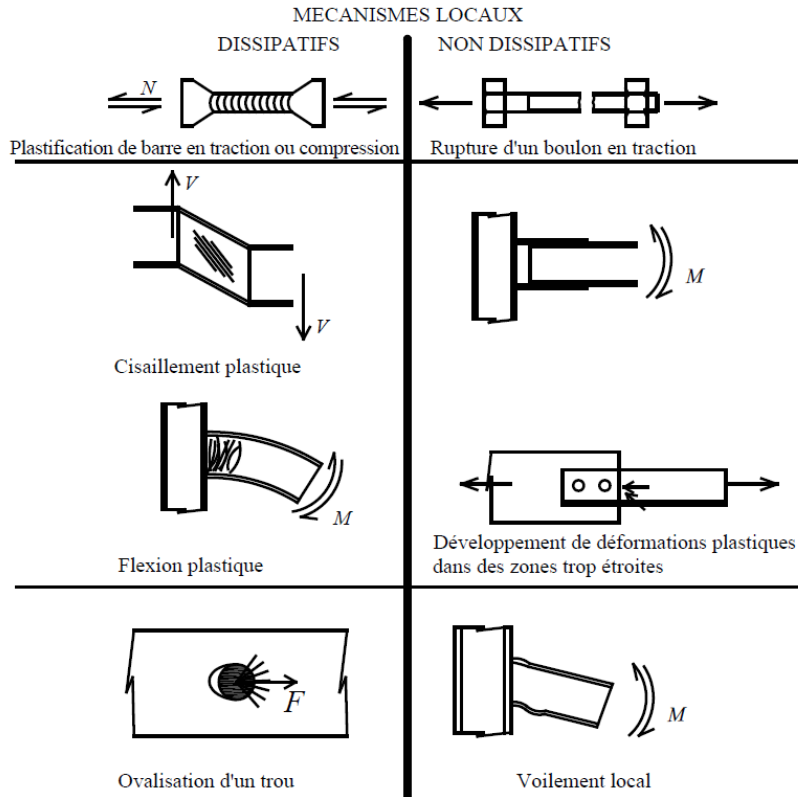


Ossatures à triangulations centrées et excentrées répondant aux critères de l'Eurocode 8



COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

A l'échelle des assemblages



COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

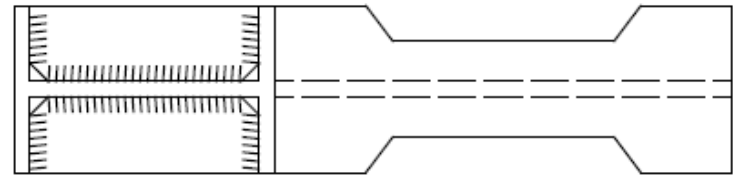
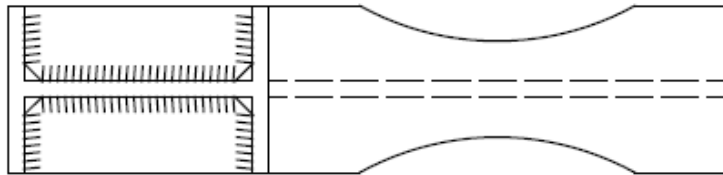
A l'échelle des assemblages



La réduction des sections d'ailes des poutres réduit les sollicitations des assemblages, des poteaux et des raidisseurs des poteaux.

COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

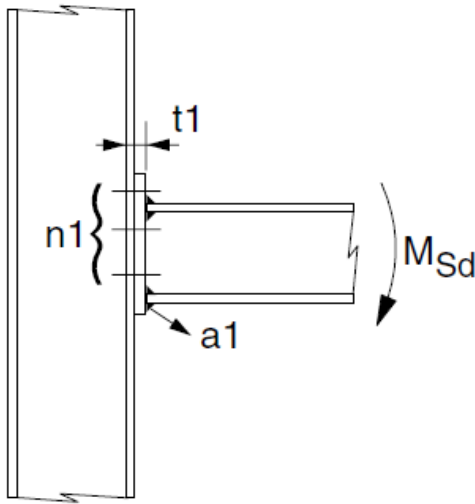
A l'échelle des assemblages



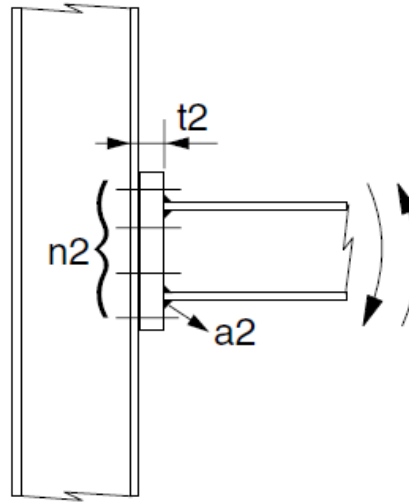
Stratégie d'affaiblissement
de la section,
(concept développé et breveté par ArcelorMittal.

COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

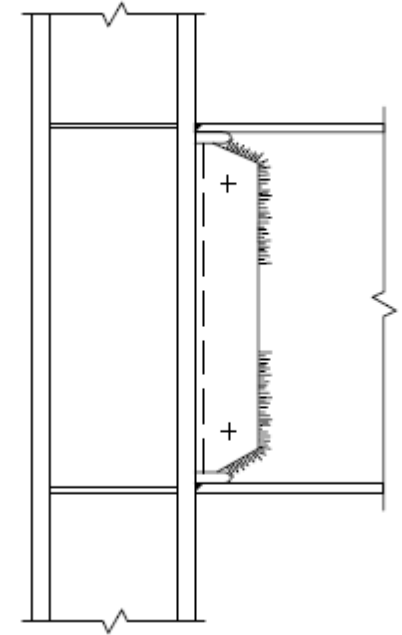
A l'échelle des assemblages



Projet statique



Projet sismique : $t2 \gg t1$ $a2 > a1$



Exemple d'assemblage dissipatif poteau/poutre

Conception d'un assemblage par plat d'about proche d'une zone dissipative.
Impact des conditions de projet sismique par rapport à un projet statique.

Type d'assemblage de poutres :
ailes soudées,
âme soudée à un gousset

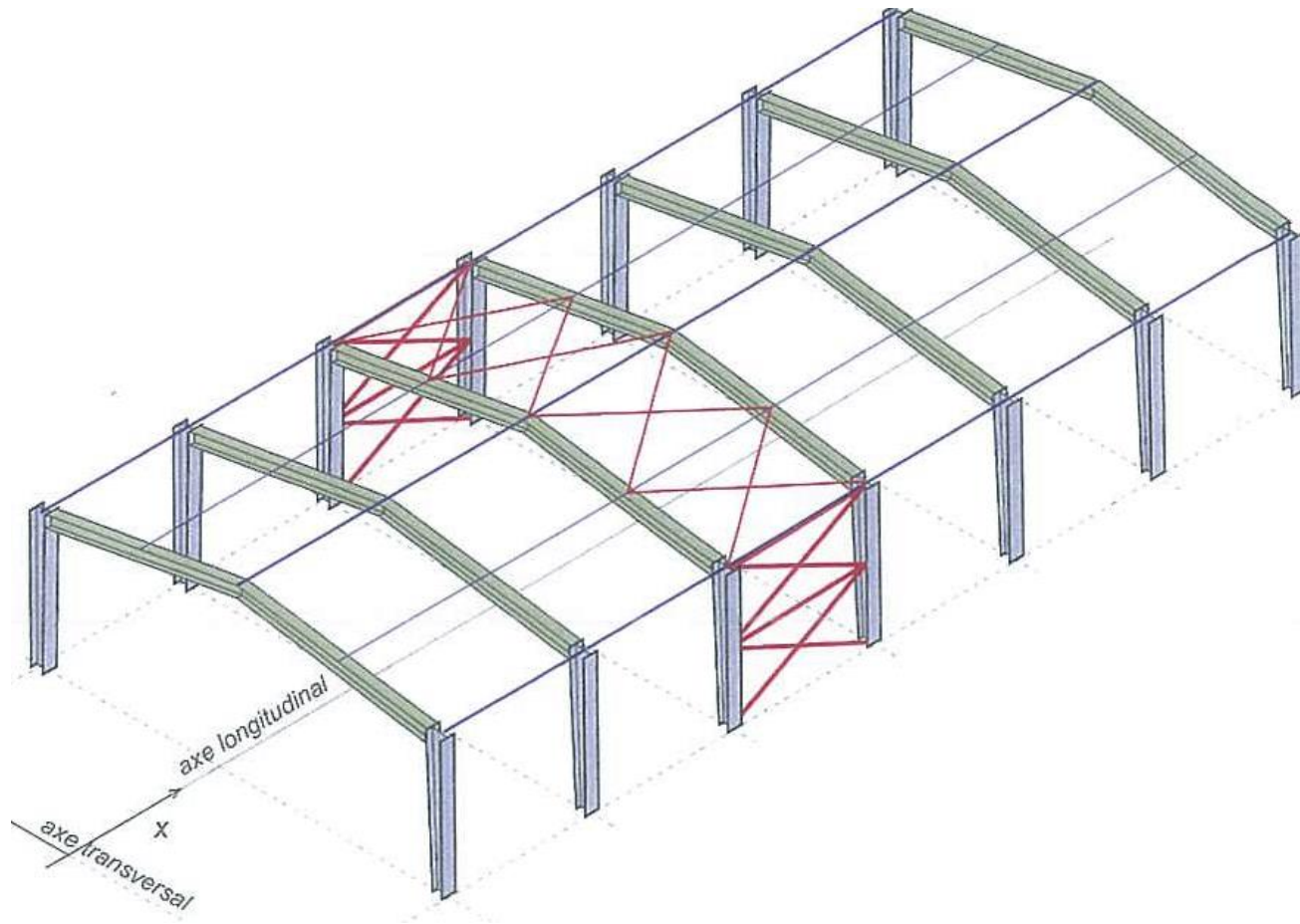
COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE

- Ossatures type portiques**
- Ossatures avec stabilisation à barres centrées**
- Ossatures avec stabilisation à barres excentrées**
- Structures hybrides ou mixtes acier-béton**

COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE: A PORTIQUE



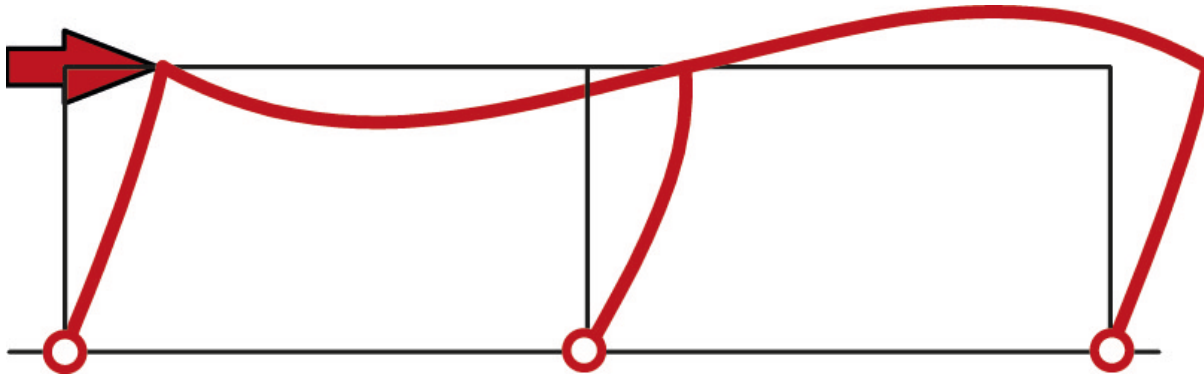
COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE: A PORTIQUE



COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE: A PORTIQUE

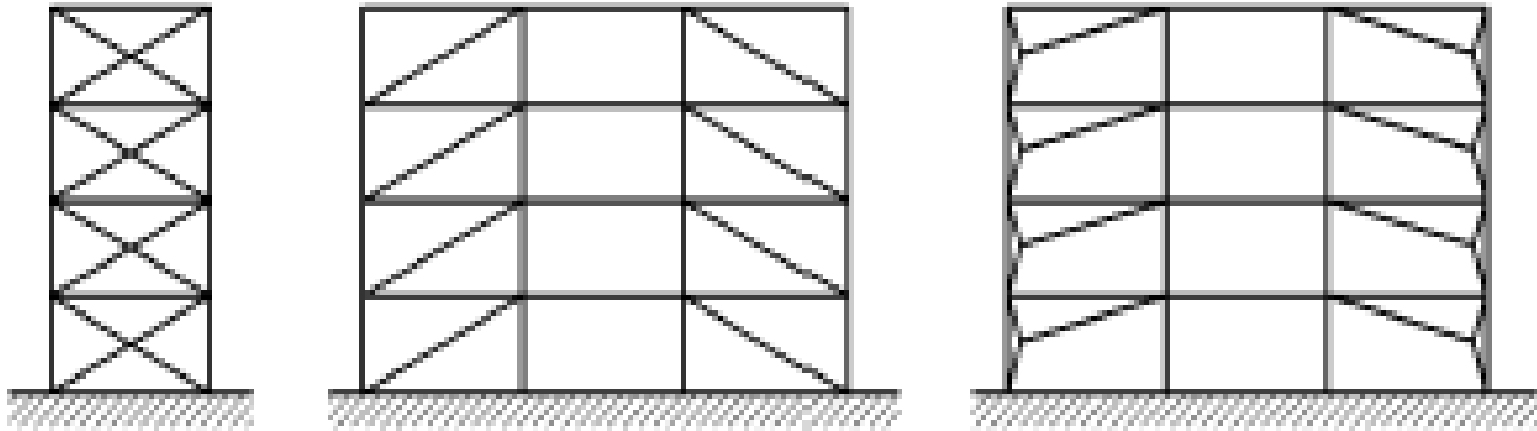


Tous les composants de ce type de structure (poteaux et poutres) participent à la reprise des efforts verticaux et horizontaux.

- La résistance au séisme est assurée principalement par la flexion des poteaux et des poutres

COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE: Ossatures avec stabilisation à barres centrées



**Ossatures avec stabilités verticales à diagonales
centrées en V**

**La résistance aux forces horizontales est
assurée**

**principalement par les diagonales tendues et
comprimées**

COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

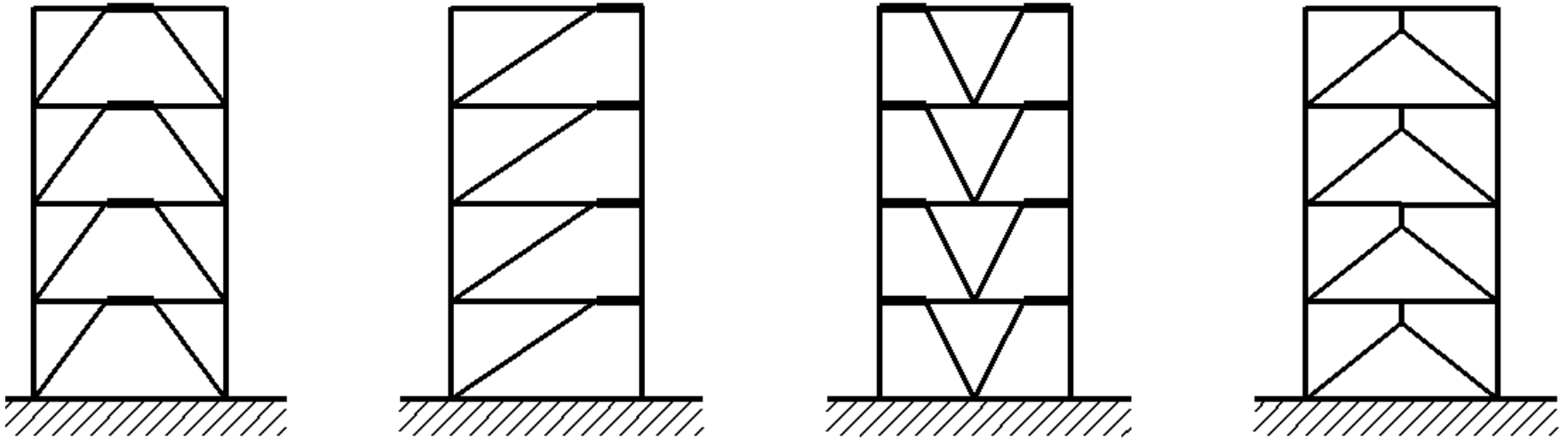
TYPOLOGIE Ossatures avec stabilisation à barres centrées



(Parking - Séisme de Christchurch 2011 – Source Rapport
Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande)

COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE Ossatures avec stabilisation à barres excentrées



Ossatures avec stabilités verticales excentrées

**La résistance aux forces horizontales est
principalement assurée**

par les tronçons d'excentrement fléchis ou cisailés

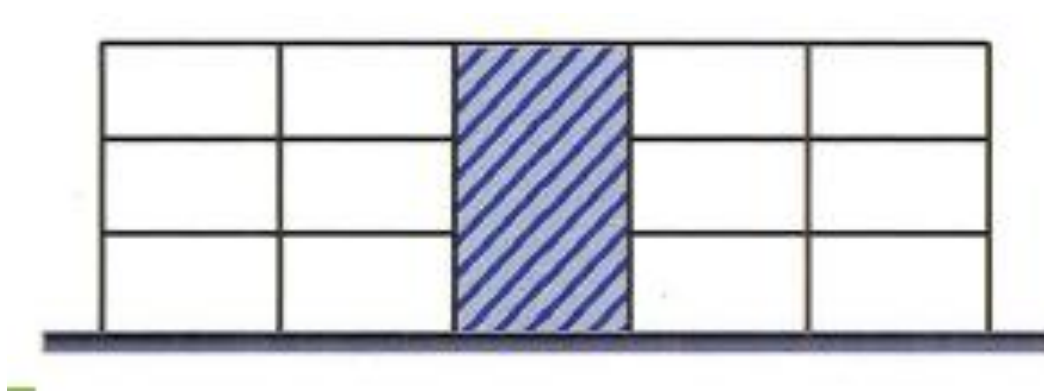
COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE Ossatures avec stabilisation à barres excentrées



COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE Structures hybrides ou mixtes acier-béton



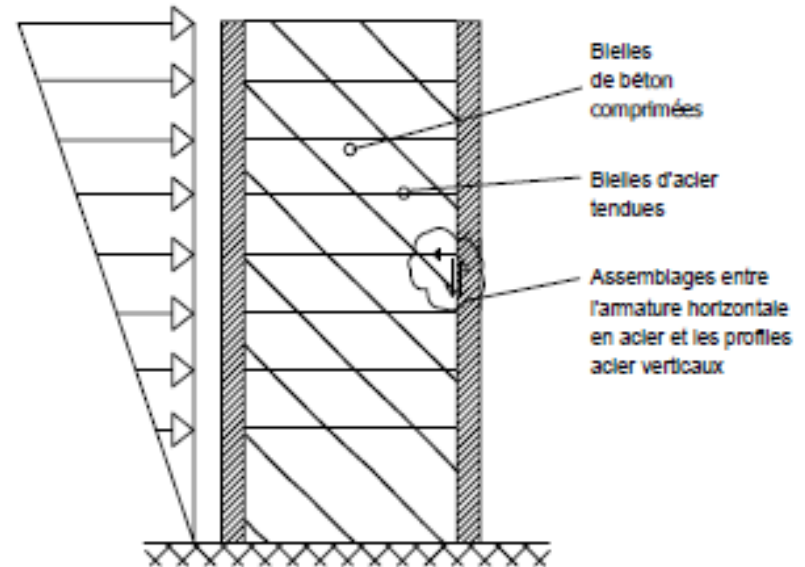
**Les structures métalliques peuvent être
parfois associées
à des noyaux ou à des voiles en béton armé,
afin d'assurer
ensemble la résistance aux forces sismiques
horizontales.**

COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE Structures hybrides ou mixtes acier-béton



Il est également envisageable de renforcer une structure de type « portique » métallique par des murs de remplissage, en obtenant ainsi une structure mixte, à condition de vérifier la l'efficacité de la connexion acier-béton entre les poteaux et les poutres en acier et les murs.



Comportement mécanique des murs cisailés mixtes

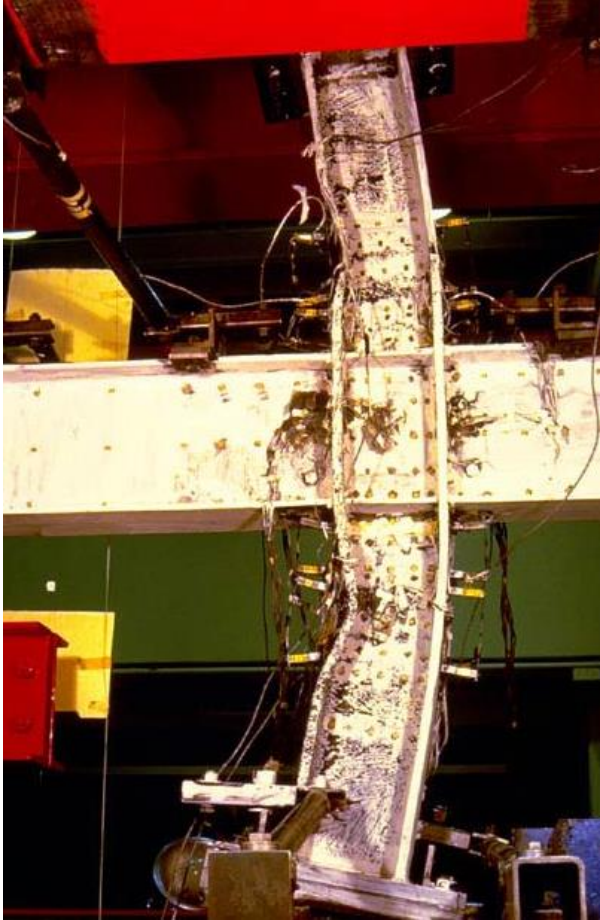
COMPORTEMENT & TYPOLOGIES DES STRUCTURES MÉTALLIQUES

TYPOLOGIE Structures hybrides ou mixtes acier-béton



Structure mixte acier-béton, Geneve

DOMMAGES CARACTÉRISTIQUES



Tests dynamiques
d'éléments de
structure en acier
(Document
USGS - USA).

DOMMAGES CARACTÉRISTIQUES



**cloquage d'un pied de poteau
acier tubulaire (Séisme de
Kobé, 1995)**
(Document EQIIS – USA)
Problématique de



**Flambement d'une
tête de poteau de
section en I (Séisme
d'anchorage, 1960)**
(Document EQIIS –
USA)

DOMMAGES CARACTÉRISTIQUES



**Maitrise du lieu de
l'éventuelle rotule
plastique (en cas de
Cs)
Doc. P Balandier**



**Flambement
d'un poteau
d'acier enrobé
de BA
(Séisme
d'Anchorage,
1964)
(Document
Karl – V.
Steinbrugge)**

DOMMAGES CARACTÉRISTIQUES



Plastification de la zone centrale du système de stabilisation (à barres centrées ou excentrées)



Arrachement des ancrages des pieds de poteaux (semelles)



**Déversement d'une poutre de grande portée
(Sendai – Séisme de Tohoku 2011, Japon – Source Rapport Université de Hokkaido)**

DOMMAGES CARACTÉRISTIQUES



Déversement de poutres (solives) sous charge Verticale

AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE



Nb! Les indications de ce paragraphe ne traitent que le volet Stabilité au Feu (SF) des éléments de structure (non protégés).

5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

CARACTERISTIQUES DES ACIERS AU FEU

Conductivité thermique élevée

C'est le principal inconvénient de l'acier, par rapport au béton par exemple. Il atteint assez rapidement une température proche de celle du milieu ambiant, surtout pour les éléments peu massifs.

Température Critique (début de ruine)

La température critique varie en fonction de la structure et de ses charges. Elle est fonction de:

- La nuance des Aciers (de S235 à S355)
- du taux de contrainte subie par la structure
- de la nature des liaisons (hyperstatique-isostatique)

Caractère plastique de l'acier

Avantage de l'acier : celui-ci jouit d'une grande plasticité, pouvant **subir des déformations sans rupture**, et retrouver *en grande partie* ses propriétés mécaniques **après refroidissement**. On a vu des bâtiments soumis à de très violents incendies garder presque intacte leur structure (métallique), alors que solives, planchers et cloisons de bois étaient partis en fumée.

5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

CARACTERISTIQUES DES ACIERS AU FEU

Coefficient de dilatation élevé (A%)

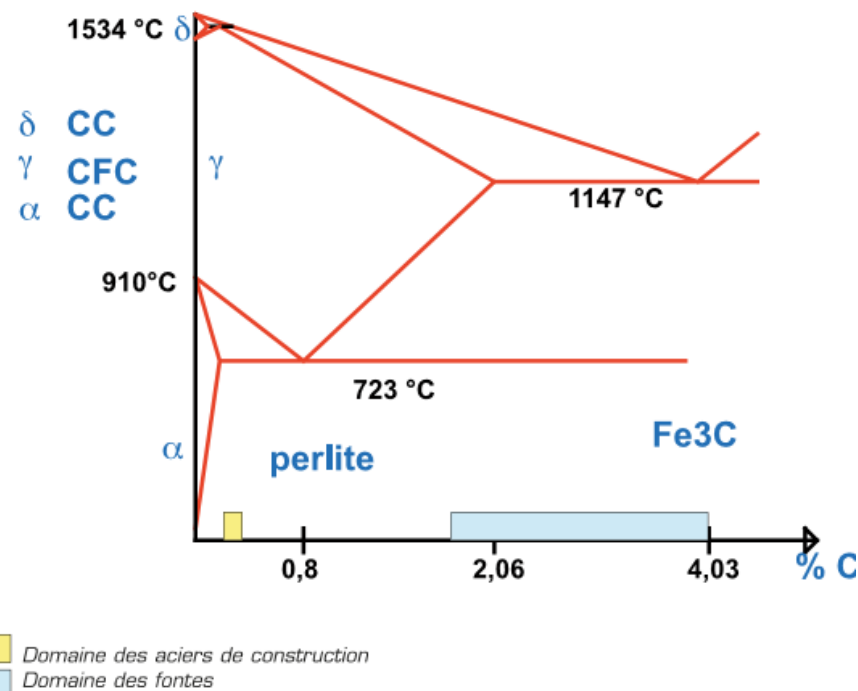
Prendre garde aux désordres que peut engendrer la dilatation de certains éléments de structure

Ex: une poutre de 10m. de long soumise à une température de 100 °C s'allonge de 14 mm, sans bridage.

Ceci est d'autant plus important lorsque l'acier est associé à d'autres matériaux. Par exemple, des poutres en acier scellées dans des murs en béton peuvent, dans une première phase de l'incendie créer des désordres dans ces parois et, dans une deuxième phase (refroidissement brutal dû à l'intervention des pompiers), échapper à leurs appuis.

5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

TRANSFORMATION DES ACIERS (diagramme de phases Fer-Carbone)



A ~ 500 °C l'acier **perd 50 % de ses capacités** et l'instabilité de la structure débute

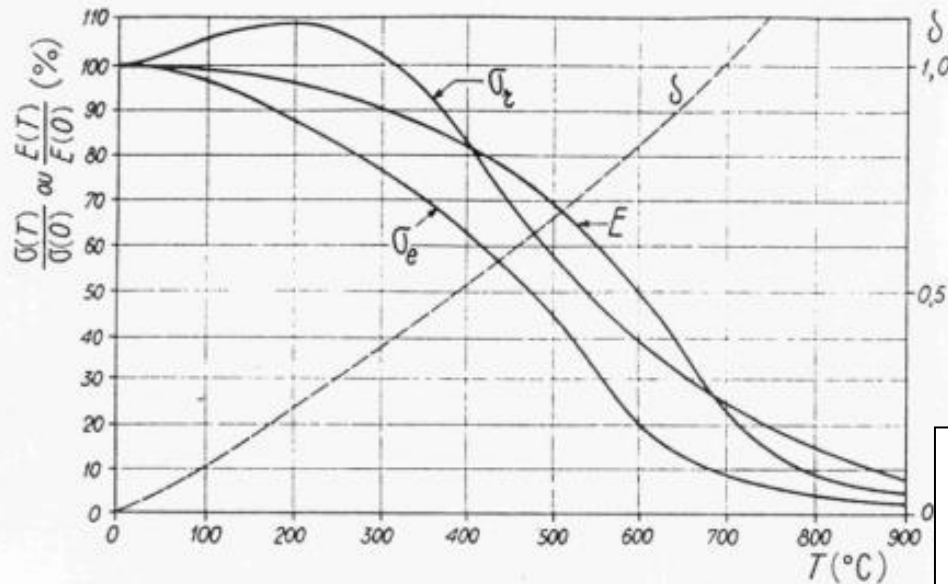
A 723 °C l'acier change de structure cristallographique et des transformations métallurgiques peuvent intervenir; elles sont **REVERSIBLES** mais des phénomènes tels que le **refroidissement rapide** peuvent entraîner des **effets de Trempe Localisée** (bien que faible pour les aciers « doux »!!! < à 0,3 % C)

Mais
Attention aux
assemblages
(Boulons et
soudures)

Après refroidissement si la température de transformation n'a pas été atteinte, les capacités d'origines (R_e , R_r , E ,...) **sont retrouvées** en grande partie.

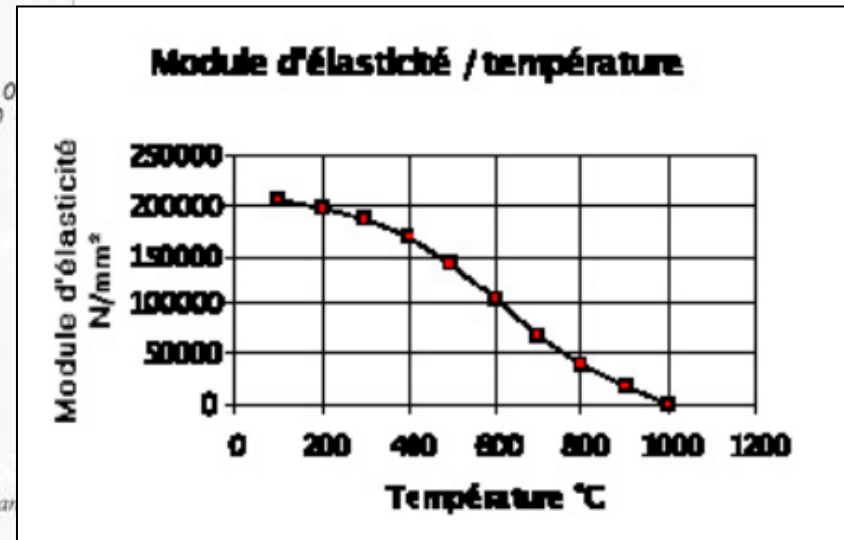
5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

Comportement global : Pertes rapides des Raideurs et des Résistances



Légende : σ_e : contrainte limite d'élasticité
 σ_r : contrainte limite de rupture
 E : module d'élasticité
 $\delta = \Delta l/l$: coefficient de dilatation linéaire

Les valeurs des caractéristiques en ordonnées sont indiquées en pourcentage de la valeur correspondante à l'empérature ordinaire.



**3 INDICATEURS (des points forts !) A VERIFIER
POUR S' ASSURER DE LA STABILITE RELATIVE
DE LA STRUCTURE AU FEU**

A. LES CONTREVENTEMENTS

B. LA MASSIVITE DES PROFILES

C. LES LIAISONS

5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

A: Contreventements

Les constructions métalliques conçues pour résister aux vents ou/et aux séismes présentent une STABILITE AU FEU plus importante que les constructions courantes. Les dispositifs supplémentaires de **contreventements**, en X et en Y, augmentent cette réserve de sécurité pour tous les personnels.



Haute-Loire, 2015, stockage fourrage



5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

Exemple de ruine imminente (Instabilité structurelle globale)

Flambement généralisé des hauts de poteaux (HEA)

Déversement généralisé des pannes

Effondrement du plancher (charge thermique en Rdc)



Tarbes, 2009, locaux techniques municipaux-centre ville-
Image Laurent DARD/DDM

**MANQUE DE
PALEES DE
STABILITE
!!!!!!**

5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

PARIS , 16 RUE RIQUET , 2007, POMPIERS DE PARIS / SD SDIS 95-

Exemple de Contreventements effectifs (murs de maçonnerie)

Palée résiduelle
assurant la
stabilité en Y



Mur transversal
assurant la
stabilité en X



Étalement reprise
des charges
verticales
(Charpentiers de
Paris)

5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

B: MASSIVITE DES PROFILES

Pour un incendie donné, la température des profilés aciers est principalement fonction de leur massivité.

Celle-ci se caractérise par le **FACTEUR DE MASSIVITE A/V**

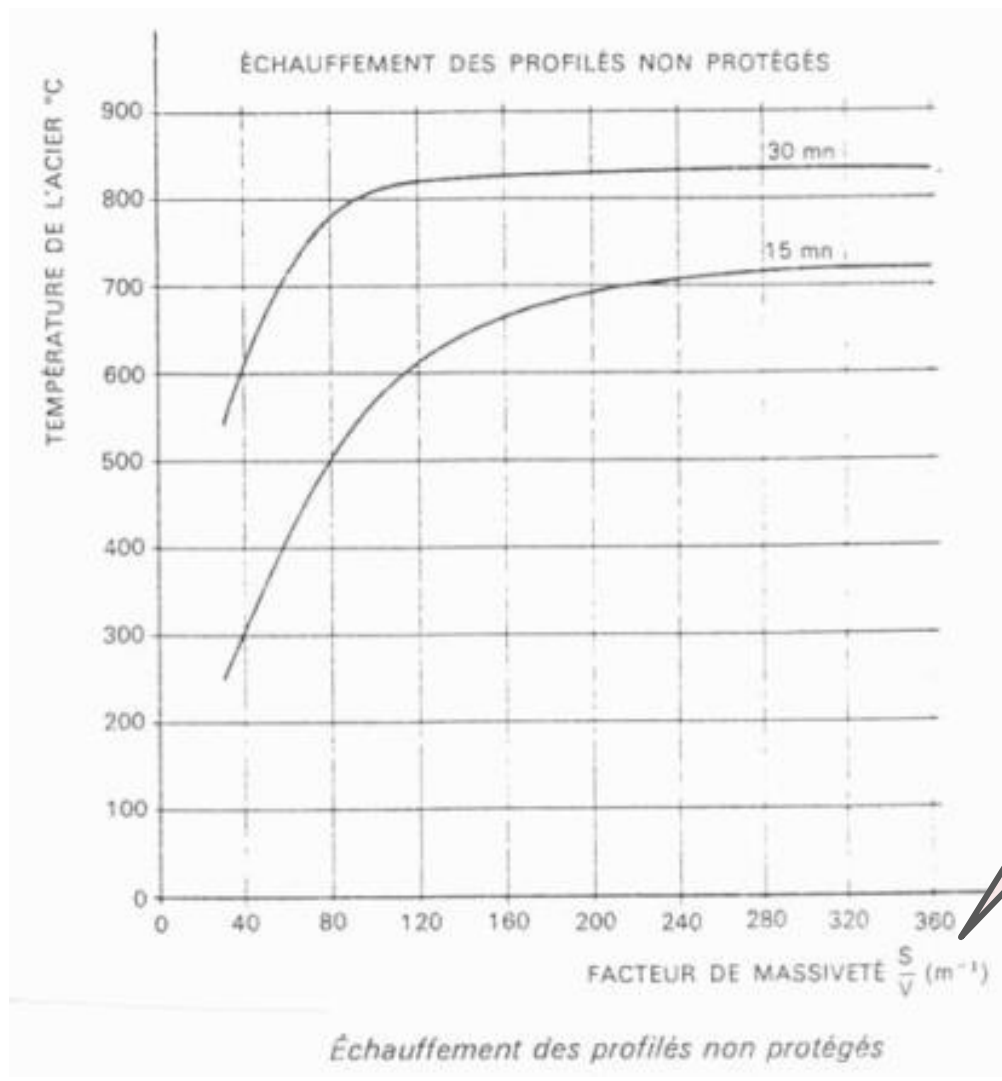
Rapport des surfaces exposées au flammes (M^2) /

Volume de l'élément par unité de longueur (M^3)



5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

COURBES ECHAUFFEMENT DES ACIERS A 15 mn et 30 mn

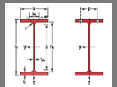


Rapport des surfaces exposées au flammes (M²) / Volume de l'élément par unité de longueur (M₃)

5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

FACTEURS FAVORABLES A LA STABILITE D'ENSEMBLE:

EFFET DE MASSIVITE DES PROFILES (Laminés a chaud)

IPE 	TEMP. À 15 mn (°C)	Facteur d'Affaibliss. $K_y \Theta$	IPN 	TEMP. À 15 mn (°C)	Facteur d'Affaibliss. $K_y \Theta$	HEB 	TEMP. À 15 mn (°C)	Facteur d'Affaibilis $K_y \Theta$
100	713	0.214	100	698	0.233	100	652	0.344
200	688	0.259	200	666	0.312	200	577	0.541
300	664	0.316	300	611	0.443	300	519	0.719
400	635	0.387	400	553	0.615	400	486	0.809
500	612	0.441	500	501	0.776	500	472	0.840
600	582	0.524				600	471	0.843



Impact du facteur d'affaiblissement

Il s'applique directement sur les résistances de l'acier (R_e , R_r et E) des portiques
Avec, par exemple, une chute en 15 mn de l'ordre de 80 % pour l'IPE 100 !!!
Et de 50 % pour l'IPE 600

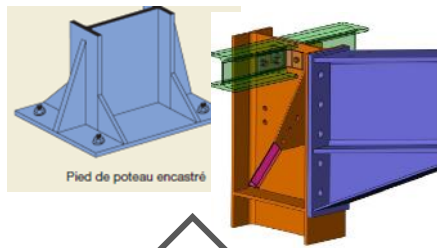
La massivité est donc un gage supplémentaire de STABILITE !!!!

5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

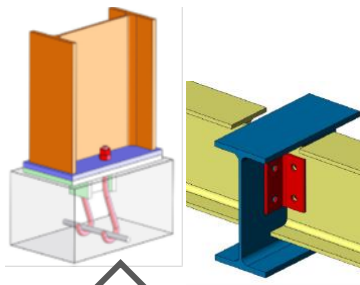
C: LES LIAISONS

Hyperstatique, Isostatique ou Hypostatique !!

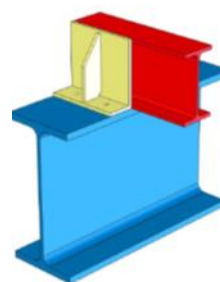
Rappel: suivant les types de liaison les ddl (déplacements/Dilatation) sont autorisés ou pas!



Exemple: Svt DTU
Feu Acier pour une
poutre et un poteau
hyperstatiques on
considère une
Température
Critique~ **550 °C**



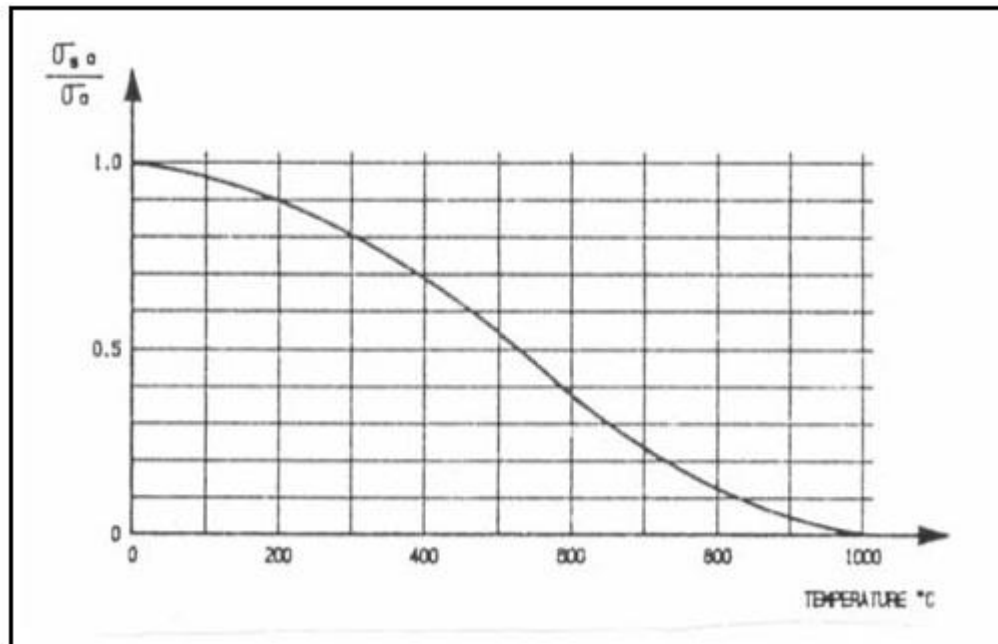
Exemple: Svt DTU
Feu Acier pour une
poutre et un poteau
Isostatiques on
considère une
Température
Critique~ **470 °C**



5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

C: LES LIAISONS

Hyperstatisme du portique = Durée de stabilité accrue

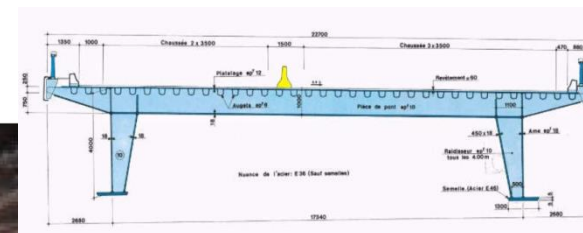
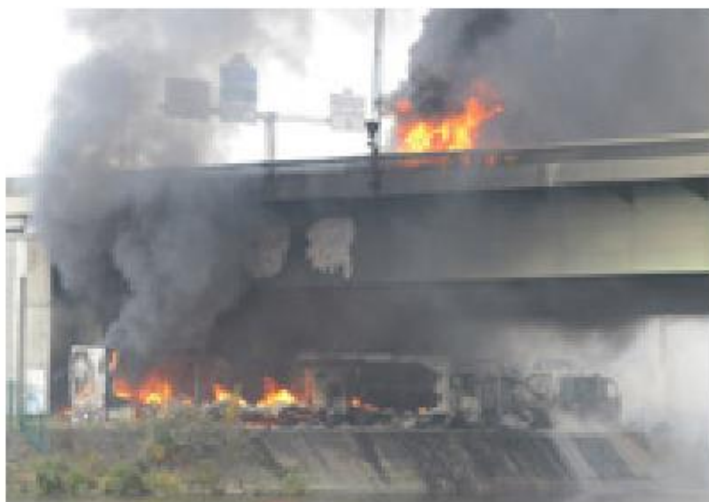


Variation de la Température Critique en fonction du Taux de contraintes résultant sur la structure (Contraintes appliquées/contrainte ultime)

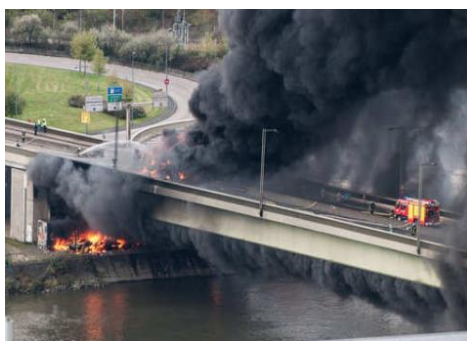
5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

C: LES LIAISONS

Cas de Dilatation contrariée Exemple : Incendie du pont Mathilde Rouen (0ct. 2012)



Figures 70 et 71 : Pont Mathilde Rouen – 29 octobre 2012 – accident d'un camion-citerne sur l'ouvrage et propagation de l'incendie sous l'ouvrage.



Double foyers



5- AUTRE CAS DE CHARGE ACCIDENTELLE: INCENDIE

C: LES LIAISONS



Flambement de l'âme de la poutre aval (Haute de 4 m)



Ondulation du platelage de la chaussée

Conclusion: L'action rapide des pompiers a permis à la structure de ne pas atteindre la température critique ($\sim 725^{\circ}\text{C}$) et éviter ainsi un effet de trempe métallurgique. Rendue Fragile, la structure aurait rompu par fissuration sous les différentes charges.

PS: Ce tronçon de tablier métallique a malgré tout été refait à neuf.

CREDITS

Crédits images, photos et illustrations

- ARCELOR MITAL
- EQUIS-USA
- USGS
- Patricia Balandier, DDE Martinique
- AFPS
- Les Techniques de l'Ingénieur
- -CTICM- Centre Technique Industriel de la Construction Métallique
- L'Indépendant – presse quotidienne
- Centre France- La Montagne-presse quotidienne
- L'Express- presse hebdomadaire
- LA DEPECHE.fr – presse quotidienne
- Edition de l'association STRRES –Spécialiste des Travaux de Réparation et Renforcement des Structures
- Rapport d'expertise du pont Mathilde Rouen - Jacques Barthelémy, Jean-Pierre Lucas, Bruno Godart – Pont Mathilde ROUEN-
- SDIS 77, CS Chelles- Cne Gilles DOMANCHIN