



Comportement au Feu des Structures en Béton Eurocode 2-1.2 (EN1992-1-2)

Dhionis DHIMA



CONTENU DE LA PRESENTATION

- **Présentation rapide de l'Eurocode 2 partie 1-2**
 - Exigences fondamentales
 - Méthodes de vérification
 - Propriétés des matériaux
 - Les règles simples
 - Modèles de calcul simplifiés
 - Modèles de calcul avancés
- **Comportement au feu de la structure d'un bâtiment (modèle avancé)**
 - Actions ISO R834
 - Actions non prédéterminées "feu naturel"
- **Conclusion**



EXIGENCES FONDAMENTALES

- La structure conserve la fonction porteuse (R) pendant toute la durée d'exposition au feu requise
- Les critères de déformations si :
 - Objectifs de protection
 - Influence sur les éléments séparatifs
- Pas de critère de déformation si :
 - efficacité de la protection évaluée selon EN 13381 (1 à 4)
 - élément séparatif satisfait les exigences d'un feu conventionnel



JUSTIFICATION AU FEU DES STRUCTURES EN ACIER

Action thermique prédéterminée ISO R834 :

- modèles de calcul simplifiés appliqués à des éléments individuels
- modèles de calcul avancés
- essais au feu
- appréciation de laboratoire agréé

Action thermique non prédéterminée :

- modèles de calcul avancés



ACTIONS

Mécaniques : EN 1990 :

- Charges permanentes
- Charges d'exploitations
- Neige
- Vent

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,1} \text{ ou } \Psi_{1,2}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

En France : $\Psi_{1,1}$

Thermiques : EN 1991-1.2 :

- ISO R834 $\varepsilon = 0,7 ; h=25 \text{ w/m}^2\text{K}$
- Actions non prédéterminées $\varepsilon = 0,7 ; h=35 \text{ w/m}^2\text{K}$



METHODE DE VERIFICATION

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

1 - Analyse par élément : $E_{d,fi} \leq \eta_{fi} \cdot E_d$

Recommandée : $(\eta_{fi} = 0,7)$

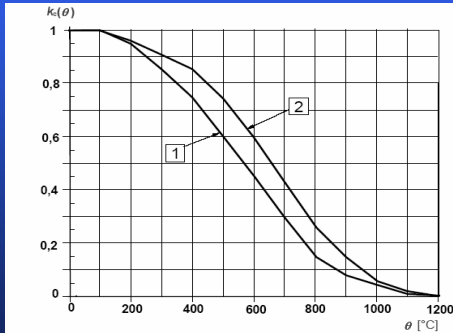
2 - Analyse de partie de structure

3 - Analyse structure globale



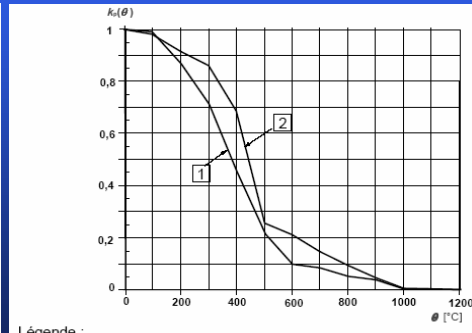
PROPRIETES DES MATERIAUX

- Thermo-physiques : $\lambda(\theta)$, $C(\theta)$ et $\rho(\theta)$
- Physico-mécanique : $f_y(\theta)$



Légende :

Courbe 1 : béton de densité normale réalisé avec des granulats siliceux
 Courbe 2 : béton de densité normale réalisé avec des granulats calcaires



Légende :

Courbe 1 : acier de précontrainte formé à froid (torons et fils)
 Courbe 2 : acier de précontrainte trempé et revenu (barres)



REGLES SIMPLES (TABLEAUX)

- Considèrent deux critères : les **dimensions** transversales minimales et la **position des armatures (enrobage)**
- Sont valables jusqu'à une durée de **240 minutes**
- Concernent les bétons de masse vol. normale (entre 2 et 2,6 t/m³)
- Dispensent de la vérification à l'éclatement
- Sont fondés sur un niveau de charge de **$\eta_{fi}=0,7$**
- Assurent le respect des critères REI
- Poutres et dalles avec des granulats calcaires ou légères les dimensions minimales de la section droite peuvent être réduite de 10%
- Aucune vérification en torsion, cisaillement et ancrage
- Aucune vérification concernant l'éclatement à l'exception des armatures de peau si l'enrobage ≥ 70 mm
- Poutres et dalles $\theta_{cr}(\text{armatures})=500^\circ\text{C}$, précontrainte $\theta_{cr}=400^\circ\text{C}$ (barres) et 350°C (fils et torons)



LES REGLES SIMPLES POTEAUX

Deux méthodes sont proposées : méthode **A** et méthode **B**

La méthode A :

- Valable pour les poteaux en BA et en BP sollicités principalement en compression dans les structures contreventées.
- Longueur effective du poteau $l_{0,fi} \leq 3 \text{ m}$
- Excentricité du premier ordre $\leq 0,15H$
- Section d'armatures $A_s < 0,04A_c$
- Facteur de réduction du niveau de chargement au feu $\mu_{fi} = N_{Ed,fi} / N_{Rd}$

La méthode B :

- Valable pour les poteaux en BA sollicités en flexion composée.
- Élancement des poteaux ≤ 30
- Excentricité du premier ordre $\leq 0,025b$ sans excéder **100 mm**
- Rapport mécanique de l'armature à température normale $\omega = A_s f_{yd} / A_c f_{cd}$



LES REGLES SIMPLES POTEAUX – Méthode A

Dimensions et distances minimales de l'axe des armatures au parement pour les poteaux de section rectangulaire ou circulaire

Résistance au feu normalisé	Dimensions minimales (mm) Largeur des poteaux b_{min} / distance axe-parement a des barres principales			
	Poteau exposé sur plus d'un côté			Poteau exposé sur un seul côté
	$\mu_n = 0.2$	$\mu_n = 0.5$	$\mu_n = 0.7$	$\mu_n = 0.7$
1	2	3	4	5
R 30	200/25	200/25	200/32 300/27	155/25
R 60	200/25	200/36 300/31	250/46 350/40	155/25
R 90	200/31 300/25	300/45 400/38	350/53 450/40**	155/25
R 120	250/40 350/35	350/45** 450/40**	350/57** 450/51**	175/35
R 180	350/45**	350/63**	450/70**	230/55
R 240	350/61**	450/75**	-	295/70

** Minimum 8 barres
Pour les poteaux en béton précontraint, il convient de noter l'augmentation de la distance de l'axe au parement selon 4.2.2. (4).

Pour les armatures de précontrainte, il convient d'augmenter "a" : 10 mm pour les barres et 15 mm pour les fils et torons.



LES REGLES SIMPLES POTEAUX – Méthode B

Dimensions et distances minimales de l'axe des armatures au parement pour les poteaux en béton armé de section rectangulaire ou circulaire

Résistance au feu normalisé	Ratio mécanique d'armatures ρ	Dimensions minimales (mm). Largeur des poteaux b_{min} / distance axe- parement a			
		$n = 0,15$	$n = 0,3$	$n = 0,5$	$n = 0,7$
1	2	3	4	5	6
R 30	0,100	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	300/30:350/25*
	0,500	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:250/25*
	1,000	150/25*	150/25*	150/25	200/30:300/25
R 60	0,100	150/30:200/25*	200/40:300/25*	300/40:500/25*	500/25*
	0,500	150/25*	150/35:200/25*	250/35:350/25*	350/40:550/25*
	1,000	150/25*	150/30:200/25*	250/40:400/25	300/50:600/30
R 90	0,100	200/40:250/25*	300/40:400/25*	500/50:550/25*	550/40:600/25*
	0,500	150/35:200/25*	200/45:300/25*	300/45:550/25*	550/50:600/40
	1,000	200/25*	200/40:300/25*	250/40:550/25*	500/50:600/45
R 120	0,100	250/50:350/25*	400/50:550/25*	550/25*	550/60:600/45
	0,500	200/45:300/25*	300/45:550/25*	450/50:600/25	500/60:600/50
	1,000	200/40:250/25*	250/50:400/25*	450/45:600/30	600/60
R 180	0,100	400/50:500/25*	500/60:550/25*	550/60:600/30	(1)
	0,500	300/45:450/25*	450/50:600/25*	500/60:600/50	600/75
	1,000	300/35:400/25*	450/50:550/25*	500/60:600/45	(1)
R 240	0,100	500/60:550/25*	550/40:600/25*	600/75	(1)
	0,500	450/45:500/25*	550/55:600/25*	600/70	(1)
	1,000	400/45:500/25*	500/40:600/30	600/60	(1)

* L'enrobage exigé par l'EN 1992-1-1 est normalement déterminant.
(1) Exige une largeur supérieure à 600 mm. Une évaluation particulière concernant le flambement est nécessaire.



LES REGLES SIMPLES MURS NON-PORTEURS (EI)

Murs non-porteurs en béton armé (cloisons) : $H/\delta \leq 40$

Résistance au feu normalisé	Epaisseur de voile minimale (mm)
1	2
EI 30	60
EI 60	80
EI 90	100
EI 120	120
EI 180	150
EI 240	175



LES REGLES SIMPLES MURS PORTEURS (REI)

Murs porteurs en béton armé - $H/\delta \leq 40$

Résistance au feu normalisé	Dimensions minimales (mm) Epaisseur de mur/ distance axe-parement pour			
	$\mu_{fi} = 0,35$		$\mu_{fi} = 0,7$	
	Mur exposé sur un côté	Mur exposé sur deux côtés	Mur exposé sur un côté	Mur exposé sur deux côtés
1	2	3	4	5
REI 30	100/10*	120/10*	120/10*	120/10*
REI 60	110/10*	120/10*	130/10*	140/10*
REI 90	120/20*	140/10*	140/25	170/25
REI 120	150/25	160/25	160/35	220/35
REI 180	180/40	200/45	210/50	270/55
REI 240	230/55	250/55	270/60	350/60

* L'enrobage exigé par l'EN 1992-1-1 est normalement déterminant.



LES REGLES SIMPLES

- Poutres sur appuis simples sans moments sur appuis (R)

- Poutres continues

- Dalles posées sur poutres ou sur murs :

* Dalles sur appuis simples sans moments sur appuis

* Cas des dalles continues

- Les planchers-dalles

- Les planchers nervurés :

* Un sens porteur : les règles concernant les dalles et les poutres s'appliquent

* Deux sens porteurs, sans continuité

* Deux sens porteurs, avec continuité dans au moins un sens



METHODES DE CALCUL SIMPLIFIEES

Elles correspondent aux méthodes pratiquées en France depuis 20 ans :

1. Calcul du champ de température dans la section
2. Détermination du coefficient d'affaiblissement en chaque point
3. Vérification de la section réduite

Deux méthodes sont proposées par l'annexe B de l'EC2.1-2 :

- Méthode B1 : dite de **l'isotherme à 500 °C**
- Méthode B2 : dite **par zones**

Dans tous les cas, la température est à obtenir soit par essai, soit par le calcul. Les deux méthodes exigent la connaissance des lois d'affaiblissement des matériaux



METHODES DE CALCUL SIMPLIFIEES

La méthode de l'isotherme à 500°C

Cette méthode est valable pour des dimensions minimales de sections données par le tableau suivant :

Résistance au feu	R 60	R 90	R120	R180	R240
Largeur minimale de la section mm	90	120	160	200	280

Si la température est inférieure à 500°C : **le béton est désactivé**

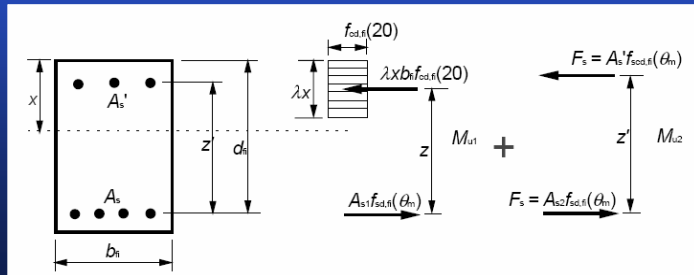
Si la température est supérieure à 500°C : **le béton est activé à pleine résistance**



METHODES DE CALCUL SIMPLIFIEES

La méthode de l'isotherme à 500°C

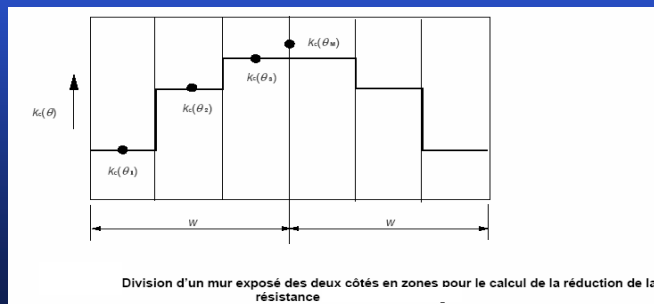
1. On calcule les températures en tout point de la section.
2. On réduit la section selon le principe précédent (*on n'utilise pas, dans ce cas, le coefficient d'affaiblissement k du béton, dans les calculs*)
3. On calcule la températures des armatures en fonction de leur position.
4. On réduit la section des armatures selon la température atteinte.
5. On justifie la section réduite : $E_{d,fi} \leq R_{d,fi}$



METHODES DE CALCUL SIMPLIFIEES

La méthode des zones

Cette méthode consiste à diviser la section droite en plusieurs zones à l'intérieur desquelles on évalue un affaiblissement moyen. Cela conduit à une section réduite de manière plus précise que selon la méthode de l'isotherme (*dans ce cas, on utilise le coefficient d'affaiblissement k du béton*)





Modèles de Calcul Avancés

- Calculs Thermiques (éléments et différence finis)
- Calculs Mécaniques (éléments finis)

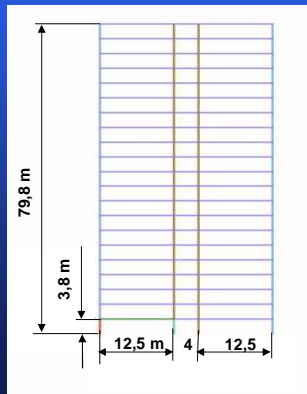
Modification des propriétés des matériaux en fonction de la température



ETUDE DE CAS

Objectif : Feu ISO : SF 2h – Feu Naturel : SF Infini

IGH – W 37 étages



- Nombre de niveaux modélisé : 21
- Hauteur d'étage : 3,80 m
- Portée des dalles de plancher : 12,50 m
- Portée des dalles de noyau : 4 m
- Hauteur totale du modèle : 79,80 m
- Longueur : 37 m
- Espacement des poteaux : 11 m
- Dimensionnement : ELS
- $E_{fi} = 25\%R_u$ (dalle)

- Eclatement du béton négligé
- Incendie au RDC :
 - Un demi-niveau
 - Tout le niveau (hors noyau central)



ETUDE DE CAS

Action thermique ISO R834 - Démarche

- Choix du modèle de calcul d'échauffement
- Calcul de l'échauffement de chaque élément de la structure
- Choix du modèle du comportement mécanique de la structure
- Calcul du comportement mécanique de la structure (ensemble)
- Calcul complémentaire de vérification de SF
 - » Effort tranchant, Résistance en compression de la bielle, Ancrage des torons
- Conclusions



ETUDE DE CAS

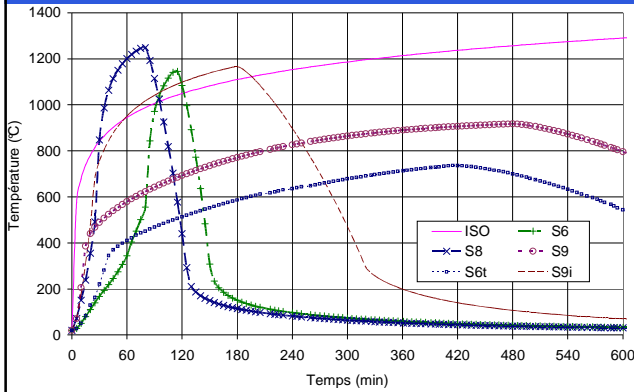
Action thermique Feu Naturel - Démarche

- Identification des foyers initiaux du feu
- Définitions des scénarii d'incendie (9 scénarii – 27 actions thermiques)
- Choix du modèle pour calculer l'action thermique
- Détermination de l'action thermique [$\theta(t)$ et/ou $\Phi(t)$]
- Choix du modèle de calcul d'échauffement
- Calcul de l'échauffement de chaque élément de la structure
- Choix du modèle du comportement mécanique de la structure
- Calcul du comportement mécanique de la structure
- Calcul complémentaire de vérification de SF
 - » Effort tranchant, Résistance en compression de la bielle, Ancrage des torons
- Analyse des résultats des calculs
- Proposition de solutions afin de satisfaire les objectifs de l'étude, si nécessaires



ACTIONS THERMIQUES

Evolution des températures des actions thermiques

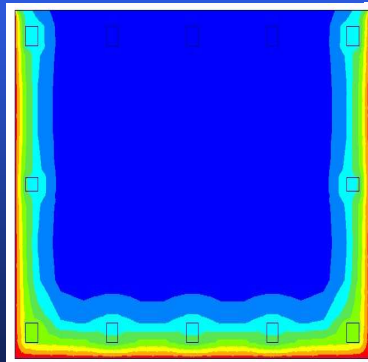


Action thermique	Local	Observation sur l'action thermique
ISO	Cellule (200 m ²)	
ISO	Niveau (2500 m ²)	
S6	Niveau	θ_{max}
S6t	Niveau	Durée maximale
S8	cellule	θ_{max}
S9	Cellule	Durée maximale
S9i	Cellule	Durée et θ intermédiaires



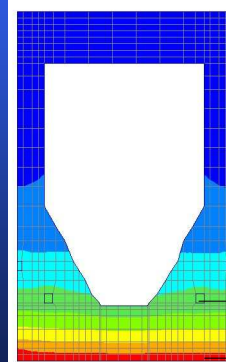
Champs de Températures

Poteau



Diamond XL for SAFIR
FILE: poteaud
NODES: 400
ELEMENTS: 437
CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT
TIME: 7200 sec
1046.10
917.71
789.33
660.94
532.65
404.16
275.78
147.39
19.00

Dalle alvéolée

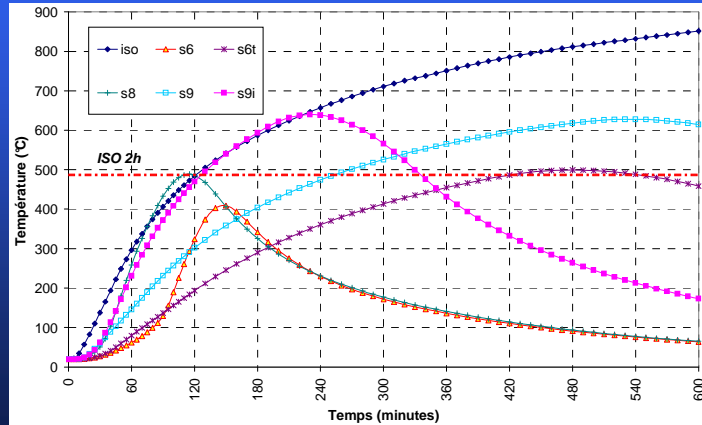


Diamond XL for SAFIR
FILE: dalle
NODES: 608
ELEMENTS: 539
ELEMENTS PLOT
CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT
TIME: 7200 sec
1026.40
895.24
792.08
674.91
567.75
440.59
323.43
206.26
89.10



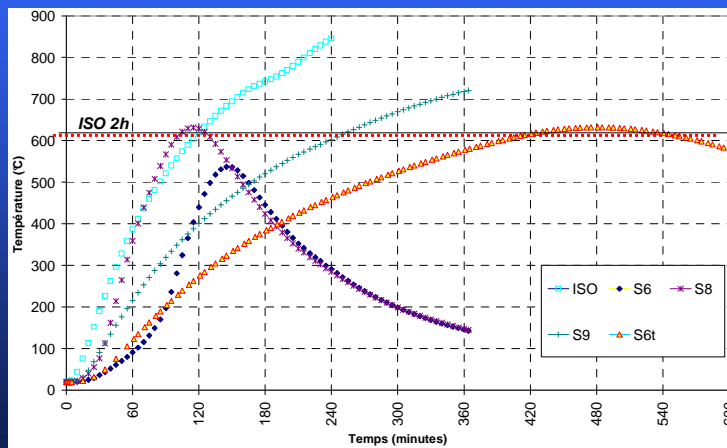
RESULTATS DE CALCUL

Evolution de la température dans l'armature la plus chauffée de la dalle



RESULTATS DE CALCUL

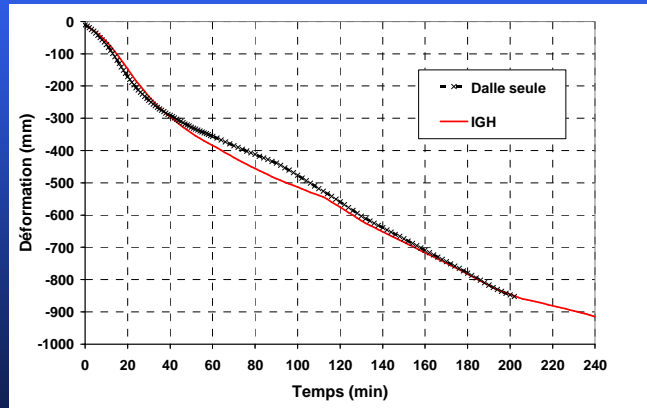
Evolution de la température dans l'armature la plus chauffée du poteau





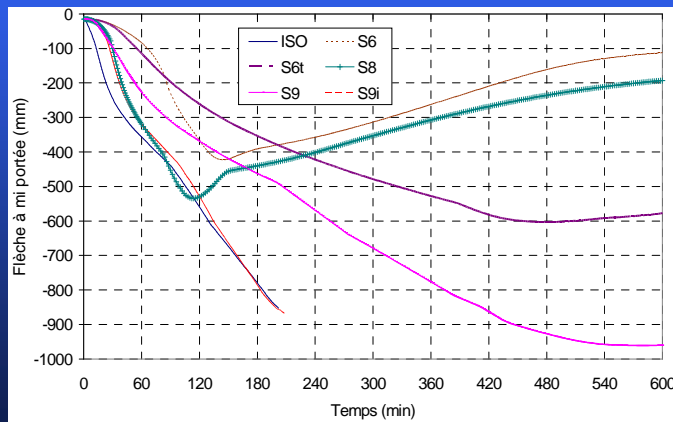
RESULTATS DE CALCUL

Evolution de la flèche à mi-portée de la dalle (action ISO R834)



RESULTATS DE CALCUL

Flèche à mi-portée de la dalle biarticulé





RESULTATS DE CALCUL

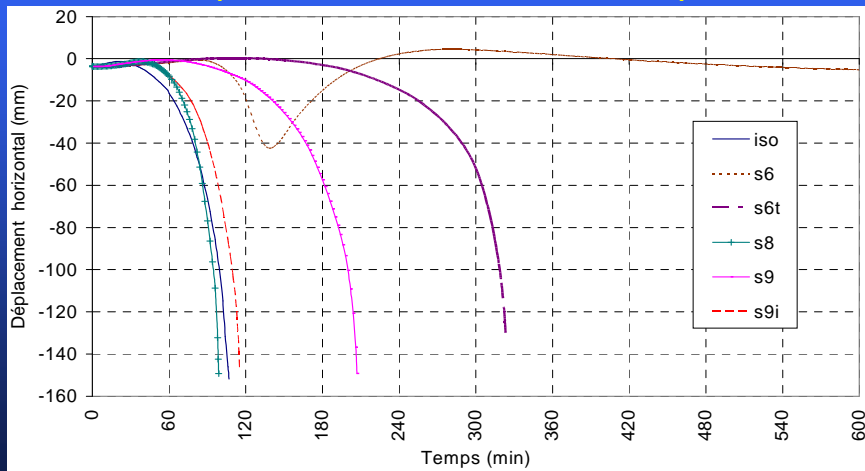
Repos d'appui	Actions thermiques	Durée de la stabilité au feu de la structure			
		Structure Isostatique	Résistance à l'effort tranchant	Adhérence des torons	Résistance en compression de la bielle
5 cm	ISO	1h45	>1h20	1h20	>1h20
5 cm	S9i	1h55	>1h15	1h15	>1h15
12.5 cm	ISO	1h45	>1h40	1h40	>1h40
12.5 cm	S9i	1h55	>1h50	1h50	>1h50
25 cm	ISO	1h45	2h30	>1h45	>4h
25 cm	S9i	1h55	3h	>1h55	>4h30

- L'élément critique de cette structure est le plancher
- La durée SF de la structure est déterminée par ces calculs complémentaires



RESULTATS DE CALCUL

Evolution du déplacement horizontal de la dalle Isostatique





CONCLUSION

- **Feu prédéterminé - ISO R834 : SF : 2h**
(exigence requise satisfaite)
- **Feu "Naturel" : SF de la structure non assurée**
(protection nécessaire)



MERCI DE VOTRE ATTENTION