

# *Conception et dimensionnement des ouvrages en bois selon les Eurocodes*

Vincent BRUN - CETE de l'Est



# Conception et dimensionnement

---

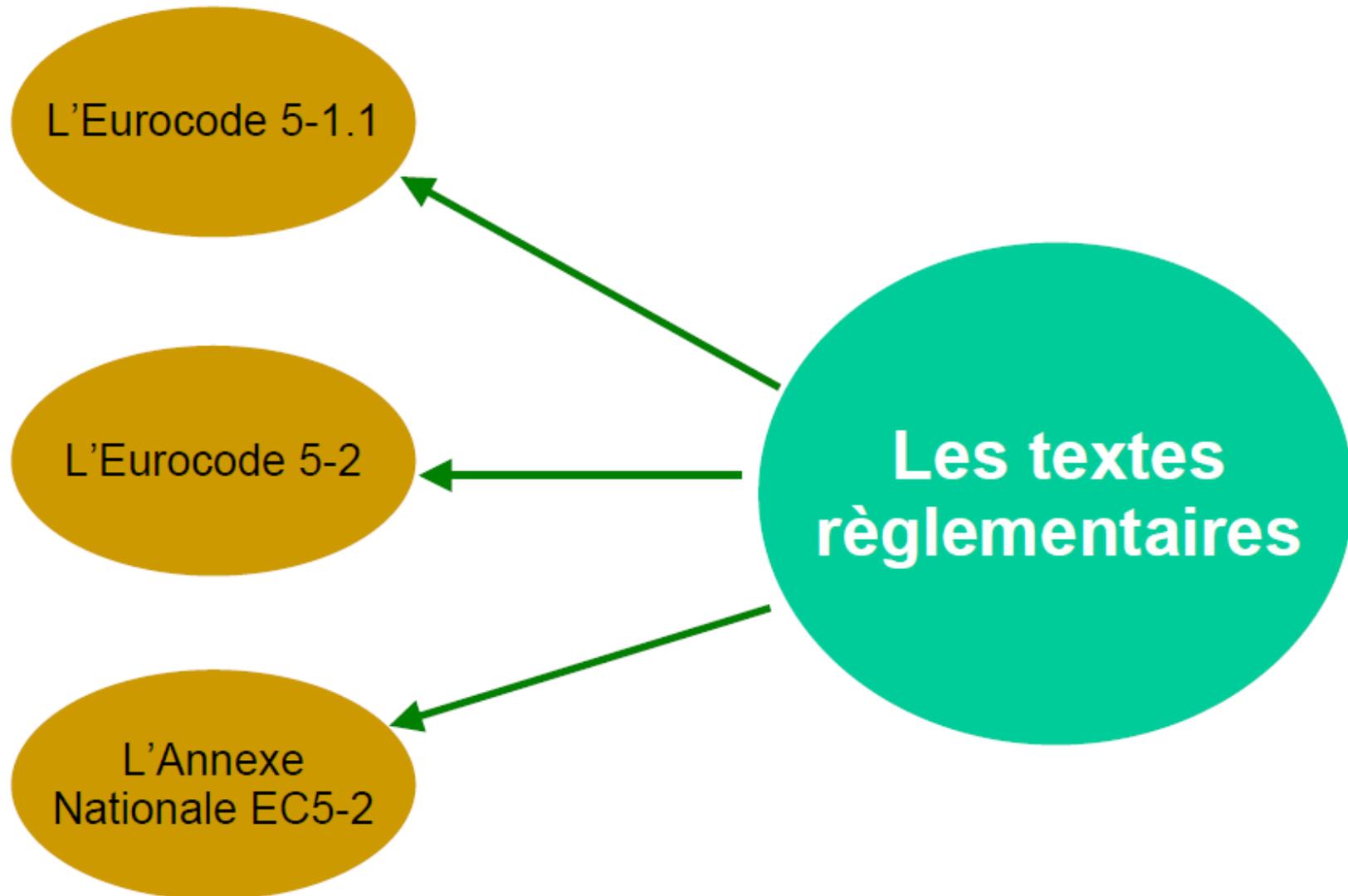
- Contexte normatif ;
- Caractéristiques de conception du bois ;
- Présentation d'un pont-type ;
- Dispositions constructives ;
- Hypothèses de calculs ;
- Assemblages bois / béton ;
- Fonctionnement mixte avec rigidité imparfaite ;
- Format des vérifications du bois ;
- Principes critères de dimensionnement.

# *Contexte normatif*



# Contexte normatif

---



# Contexte normatif

---

- ❑ Ecart de rectitude pris en compte par les méthodes de calcul de l'EC5
- ❑ Réductions de section qu'il est possible d'ignorer
- ❑ Compatibilité des déplacements d'assemblages (ELU et ELS) avec ceux supposés dans l'analyse globale
- ❑ Cas où une analyse du second ordre (prise en compte des déformations et imperfections) est indispensable.

# Contexte normatif

---

Sans oublier :

- L'Eurocode 0 : Bases de calculs
- L'Eurocode 1-2 : Actions sur les structures, partie Ponts
- L'Eurocode 3-1 : Structures en acier
- L'Eurocode 4-2 : Structures mixte acier/béton, partie Ponts

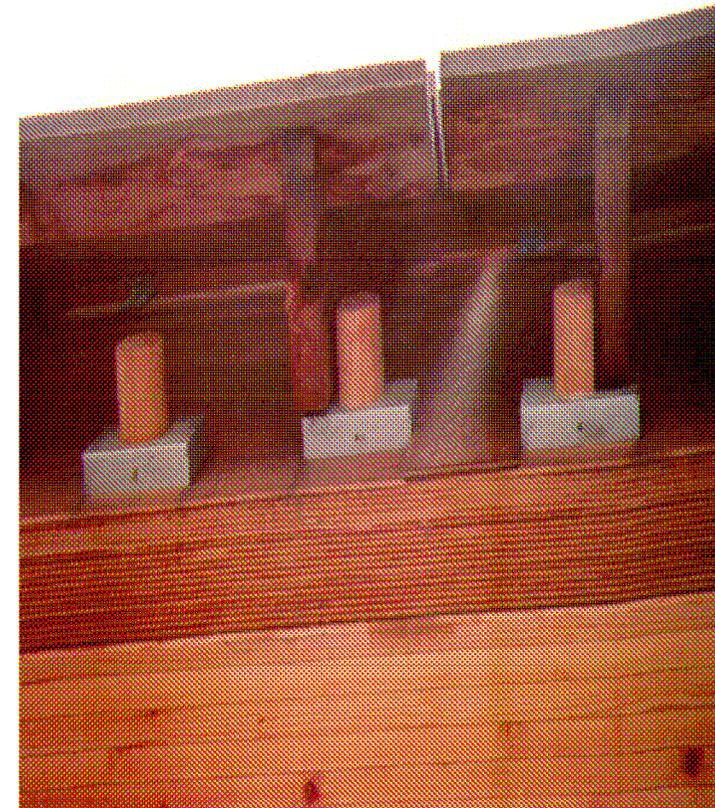
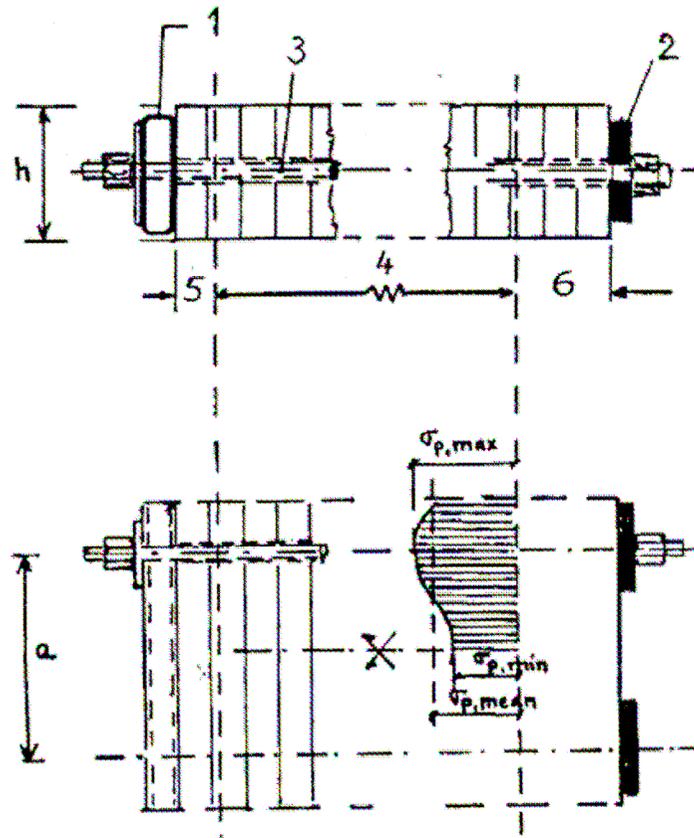
Les normes produits :

- NF EN 338 : Classes de résistance bois massif
- NF EN 1194 : Classes de résistance lamellé-collé
- ...

# Contexte normatif

Éléments non traités par l'Eurocode 5 :

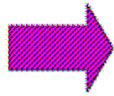
➔ Dalles lamellées, précontraintes ou non, croisées...



# Contexte normatif

---

Éléments non traités par l'Eurocode 5 :

 Tabliers bois-béton

✓ Eléments

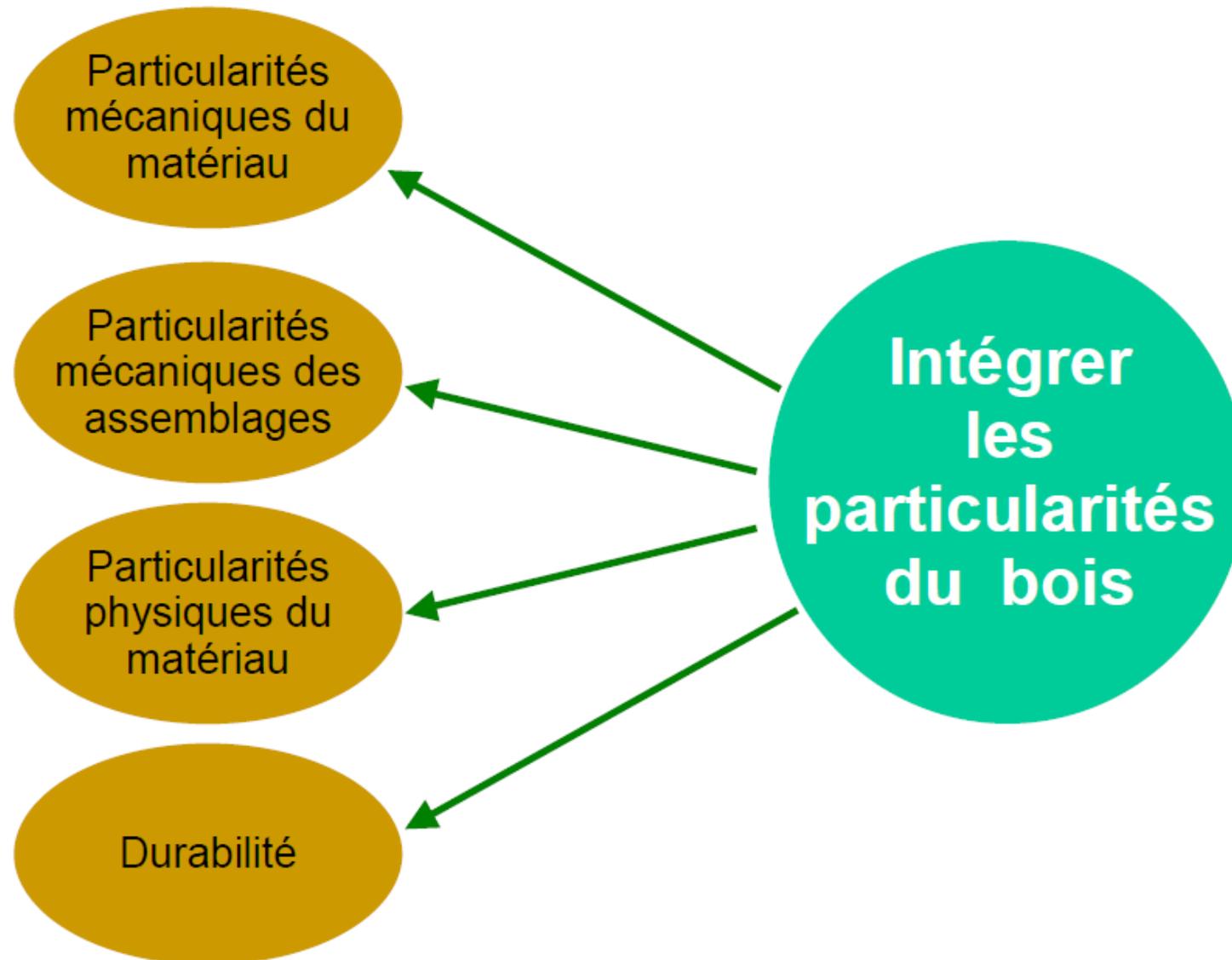
✓ Connexions

# *Caractéristiques de calcul du bois*



# Caractéristiques de conception du bois

---



# Caractéristiques de conception du bois

Particularités  
mécaniques du  
matériau

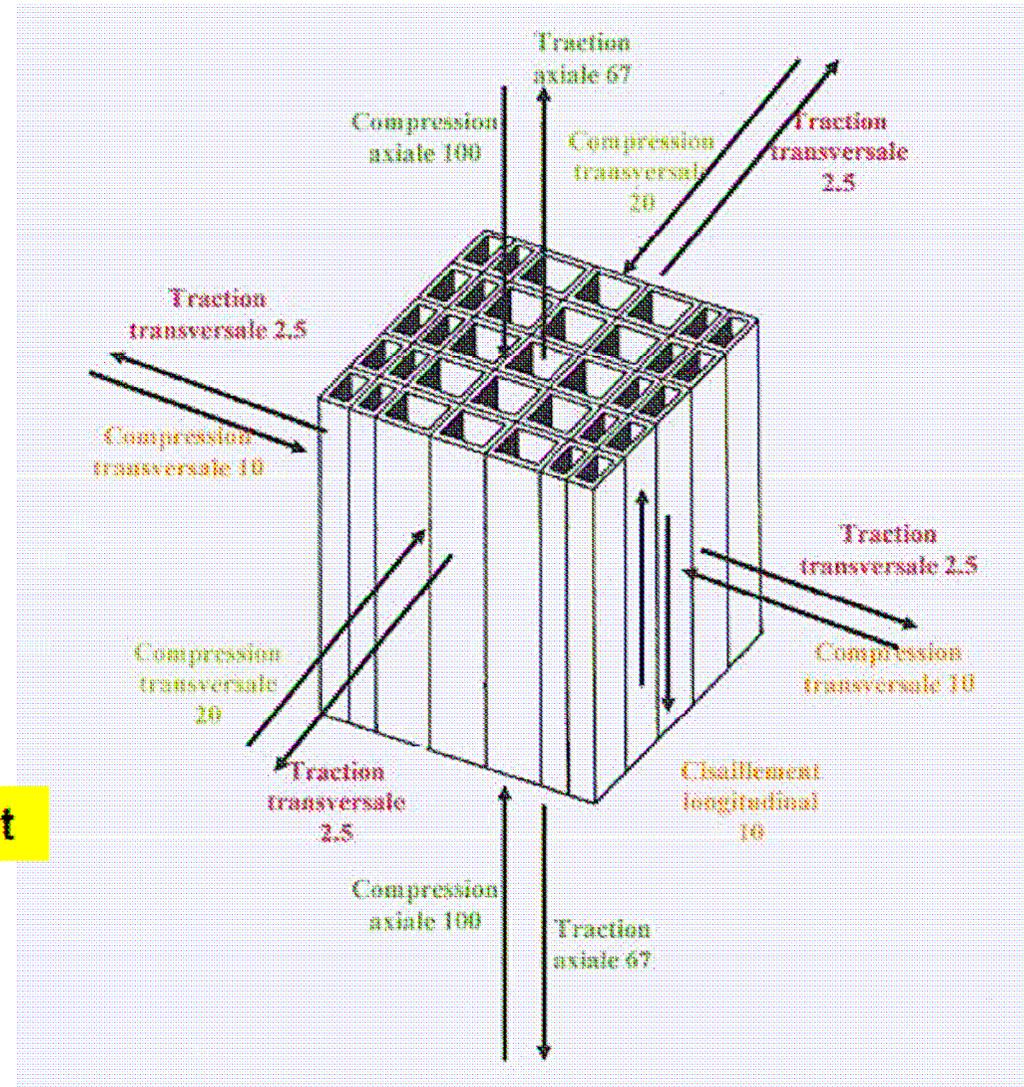
Compression axiale

Traction axiale

Compression de flanc

Cisaillement

Traction transversale



# Caractéristiques de conception du bois

---

Particularités  
mécaniques du  
matériau

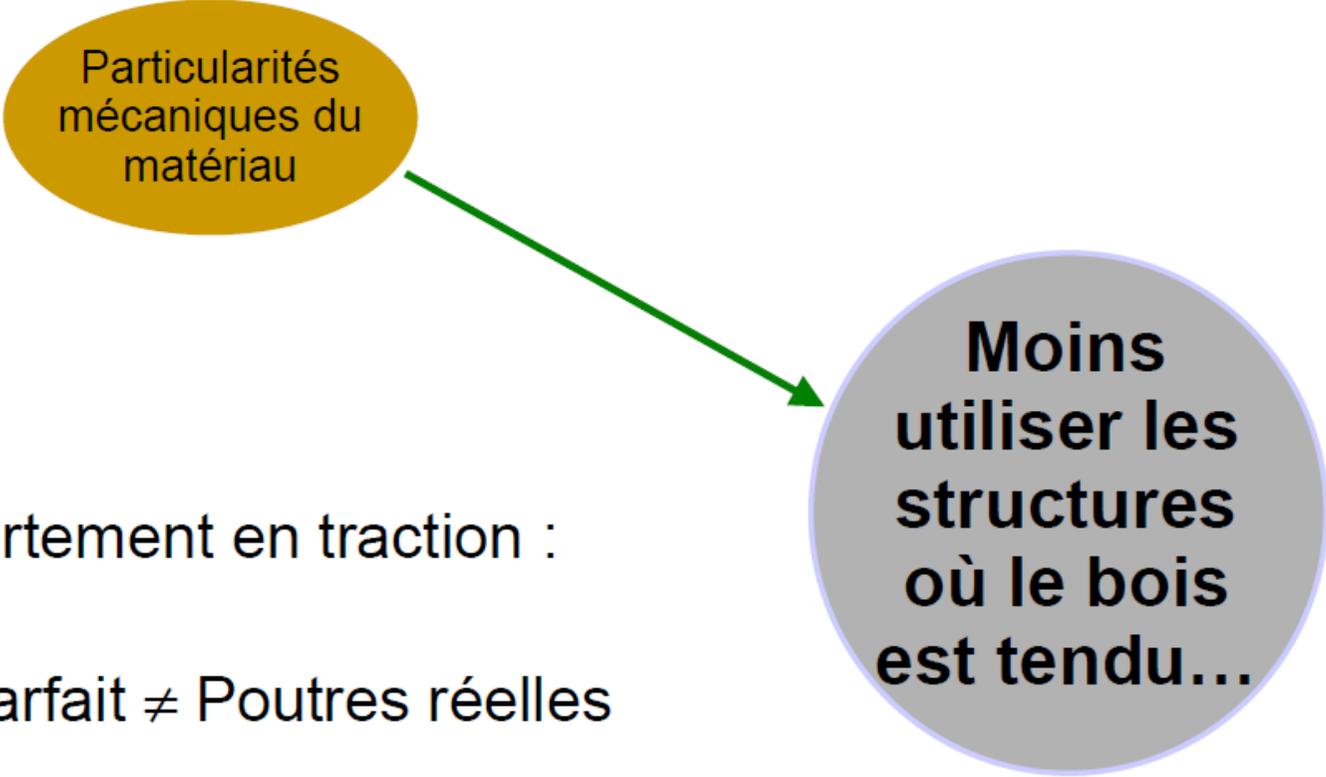
**Valoriser les  
structures  
comprimées**



# Caractéristiques de conception du bois

---

Particularités  
mécaniques du  
matériau



**Moins  
utiliser les  
structures  
où le bois  
est tendu...**

- Comportement en traction :

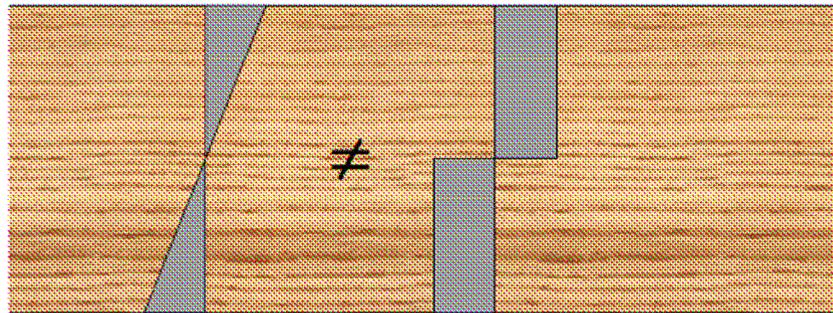
Bois parfait  $\neq$  Poutres réelles

# Caractéristiques de conception du bois

---

Particularités  
mécaniques du  
matériau

- Pas de plastification du matériau  
bois

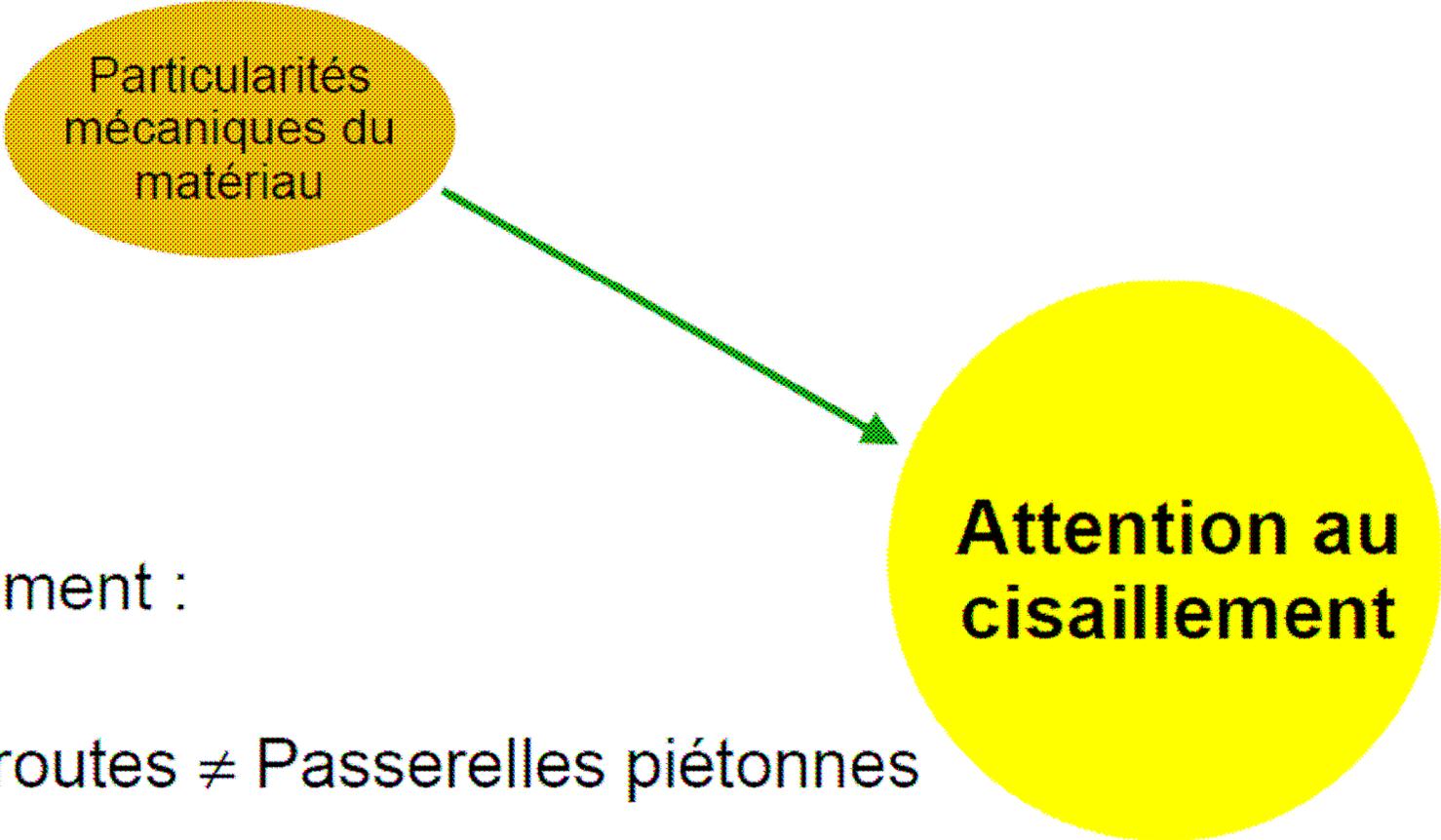


... ou même  
fléchi

# Caractéristiques de conception du bois

---

Particularités  
mécaniques du  
matériau



**Attention au  
cisaillement**

- Cisaillement :

Ponts routes  $\neq$  Passerelles piétonnes

# Caractéristiques de conception du bois

---

Particularités  
mécaniques du  
matériau



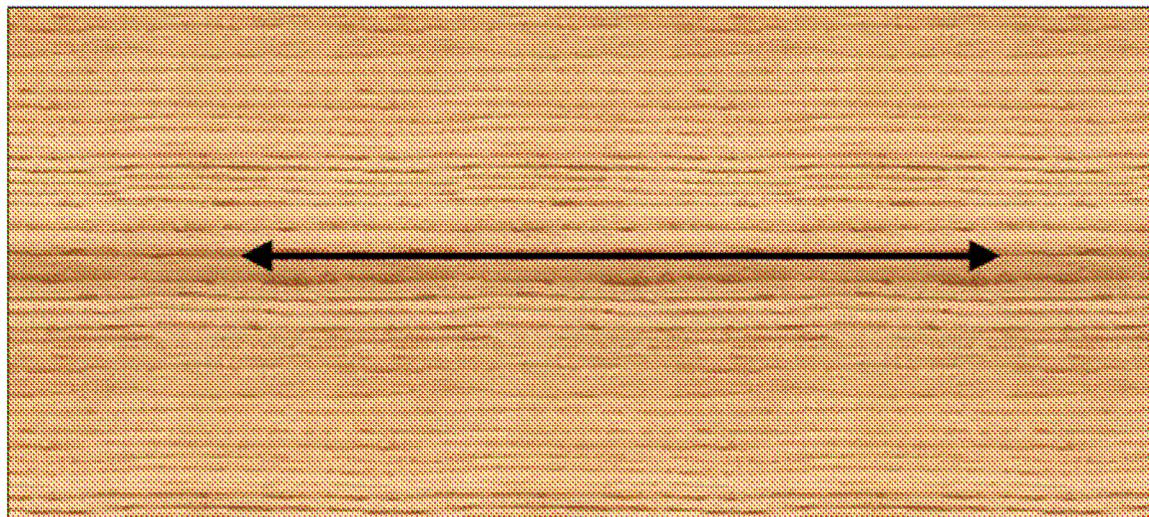
**Interdire tout  
risque de  
traction  
transversale  
élevée**

# Caractéristiques de conception du bois

Particularités  
mécaniques des  
assemblages

**Concentrer  
les  
assemblages**

- Dans le sens du fil du bois



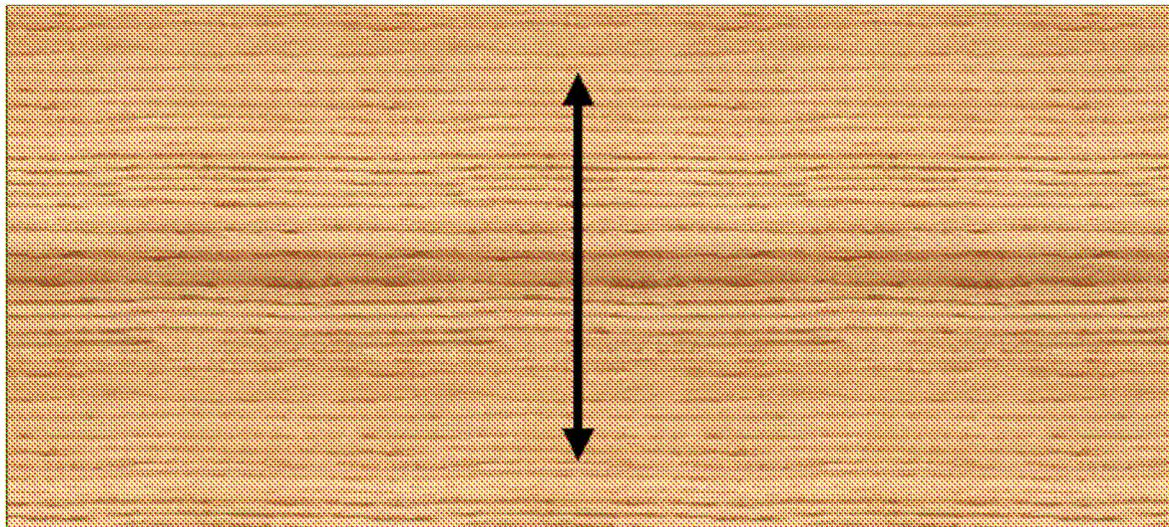
(Nombre  
efficace)

# Caractéristiques de conception du bois

Particularités  
mécaniques des  
assemblages

**Concentrer  
les  
assemblages**

- Dans le sens perpendiculaire au fil du bois



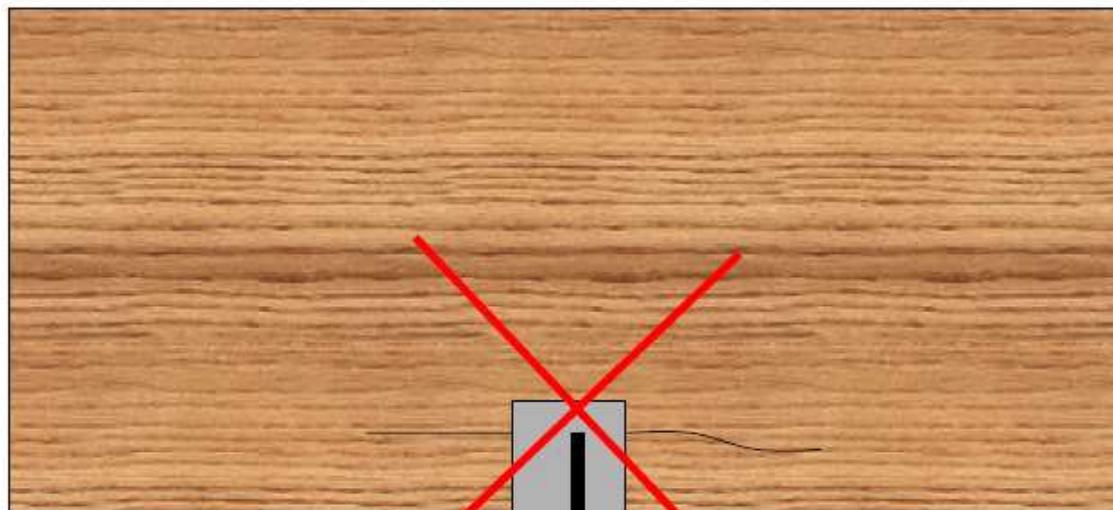
(Retrait-gonflement  
→ fissuration)

# Caractéristiques de conception du bois

Particularités  
mécaniques des  
assemblages

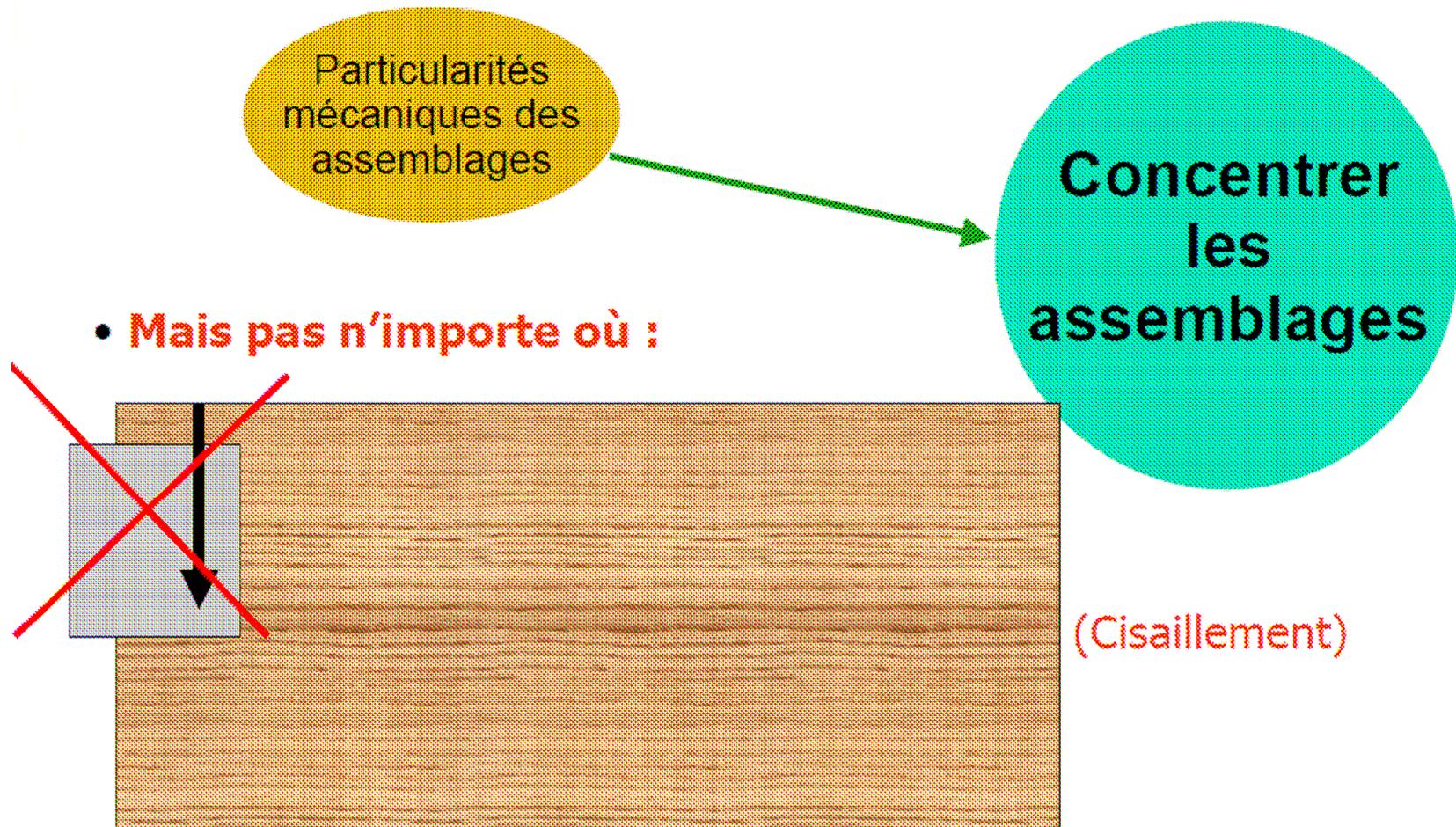
• Mais pas n'importe où :

Concentrer  
les  
assemblages



(traction  
transversale)

# Caractéristiques de conception du bois



# Caractéristiques de conception du bois

---

Particularités  
mécaniques des  
assemblages

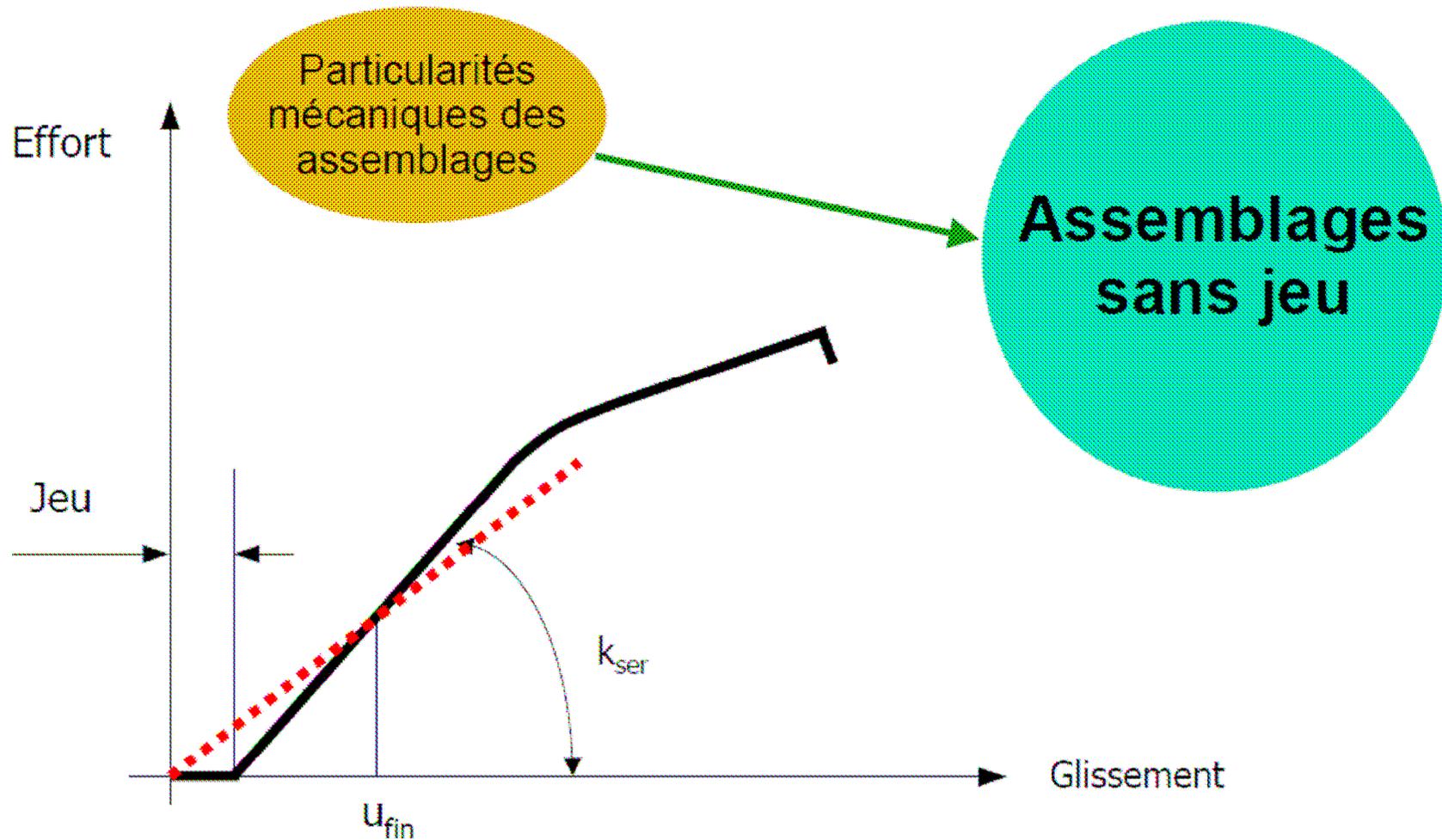
- **Mais pas n'importe où  
ni n'importe comment :**

**Concentrer  
les  
assemblages**

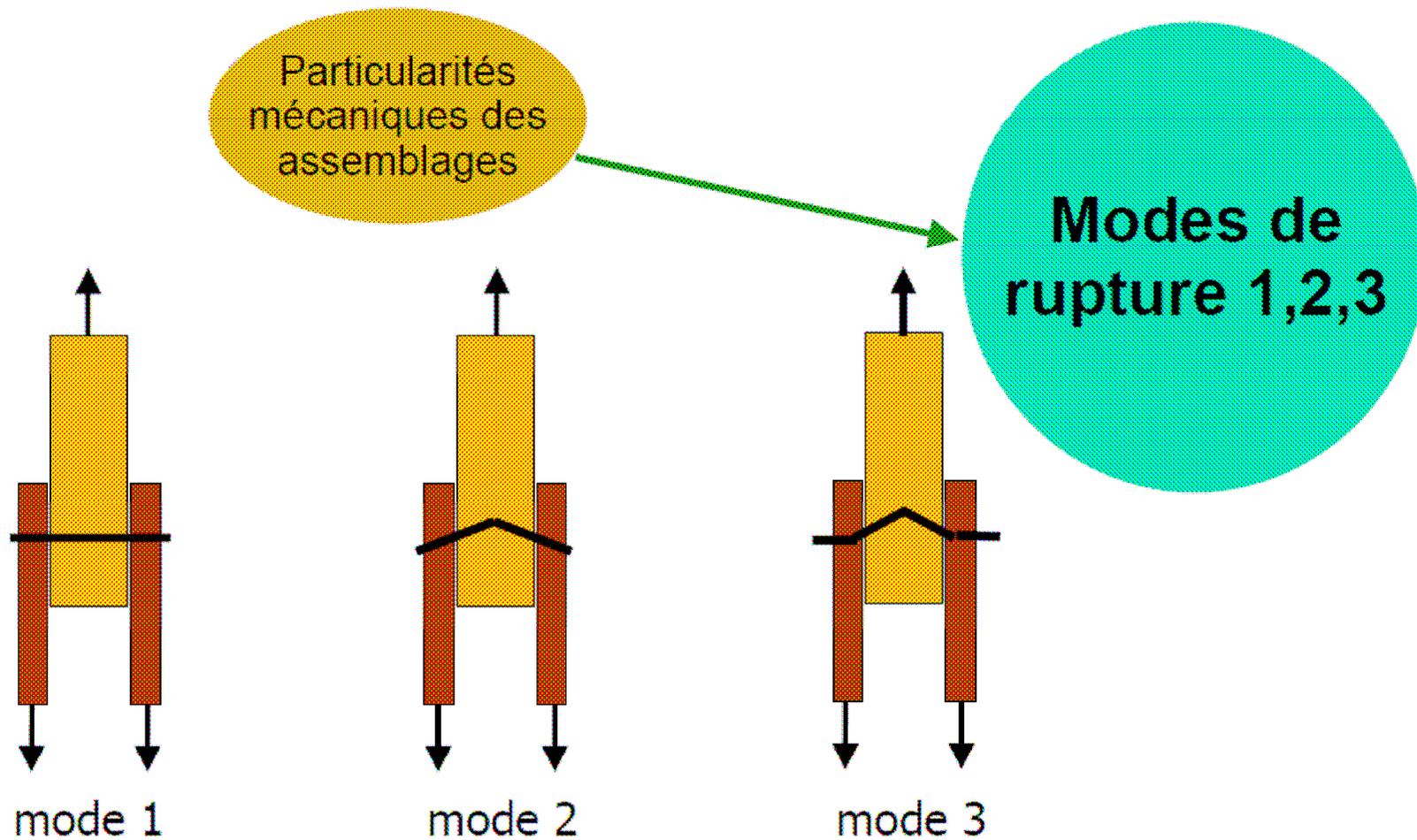


(rupture de  
bloc)

# Caractéristiques de conception du bois



# Caractéristiques de conception du bois



# Caractéristiques de conception du bois

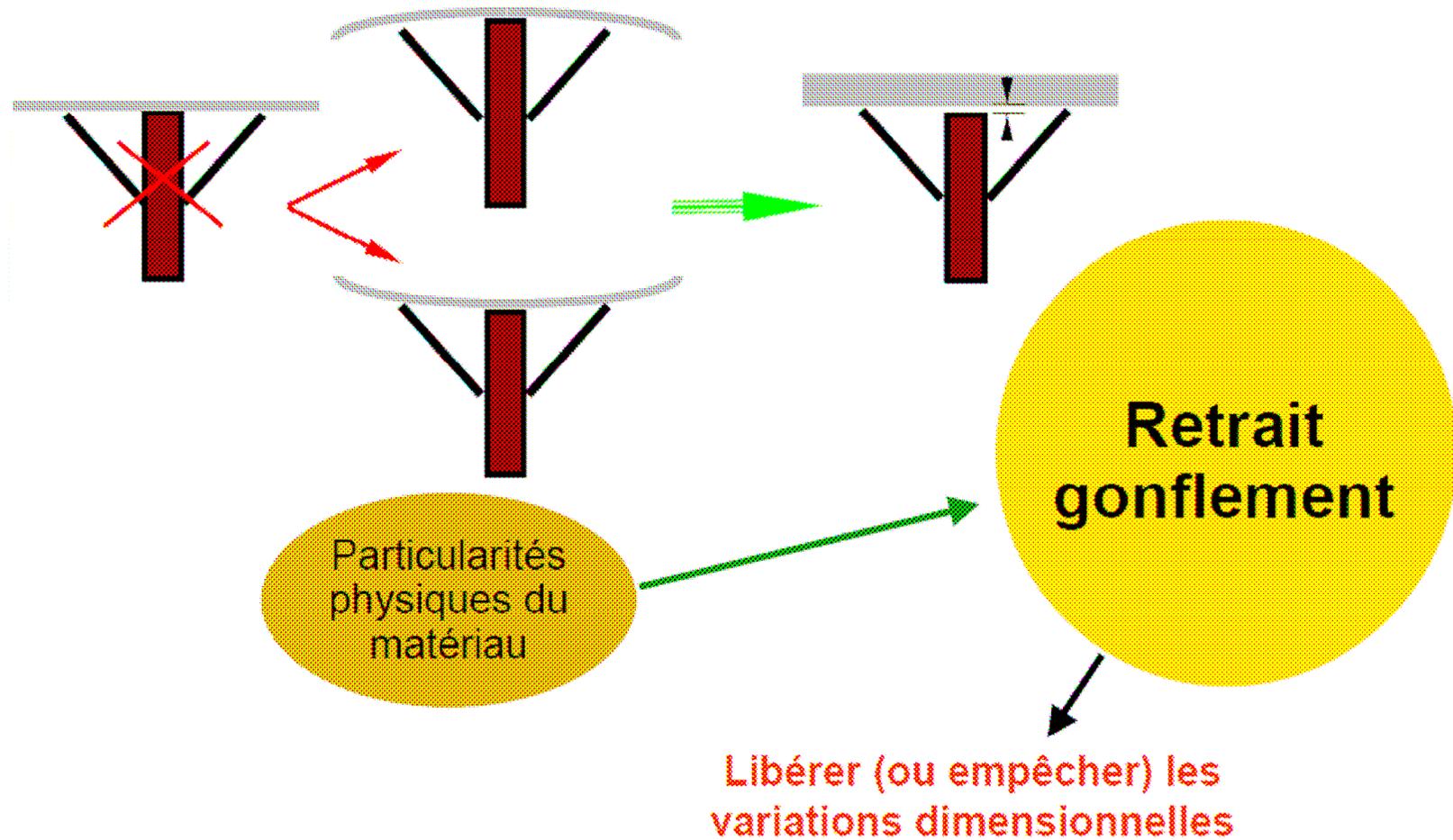


Particularités  
physiques du  
matériau

**Retrait  
gonflement**

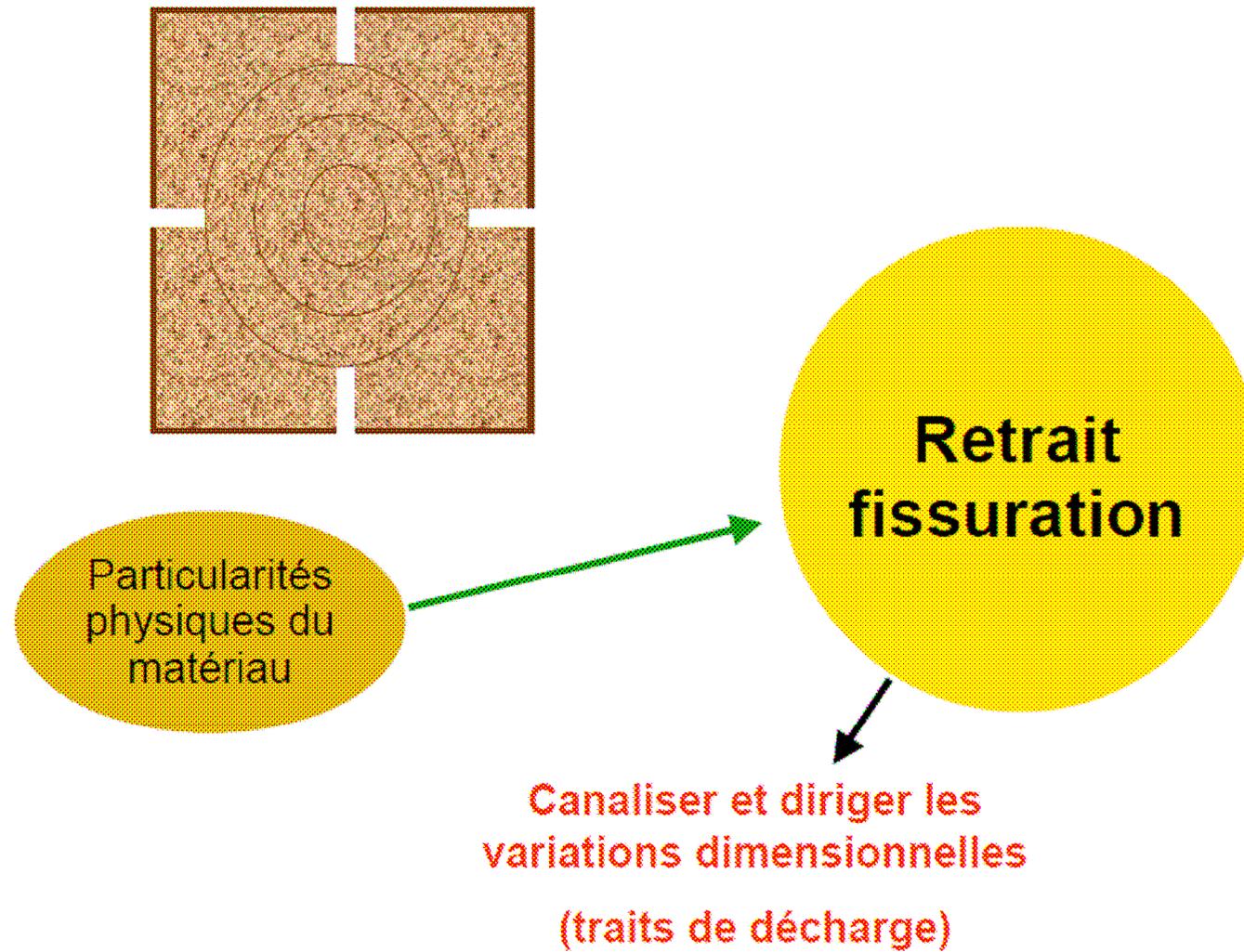
**Libérer (ou empêcher) les  
variations dimensionnelles**

# Caractéristiques de conception du bois

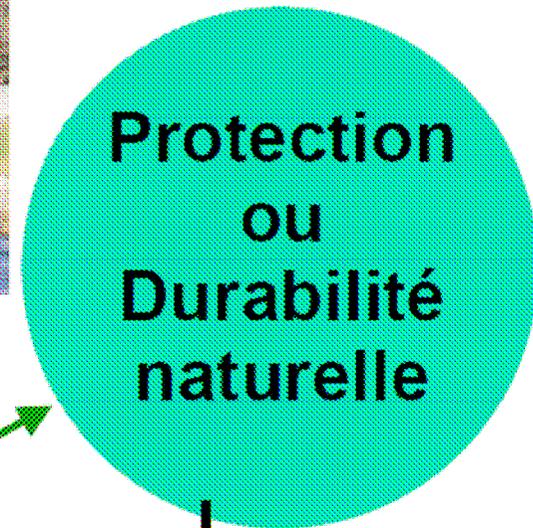
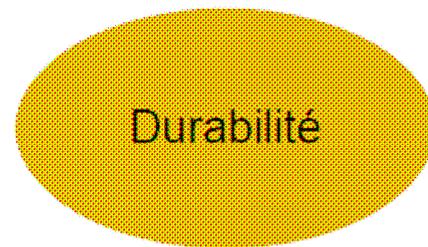
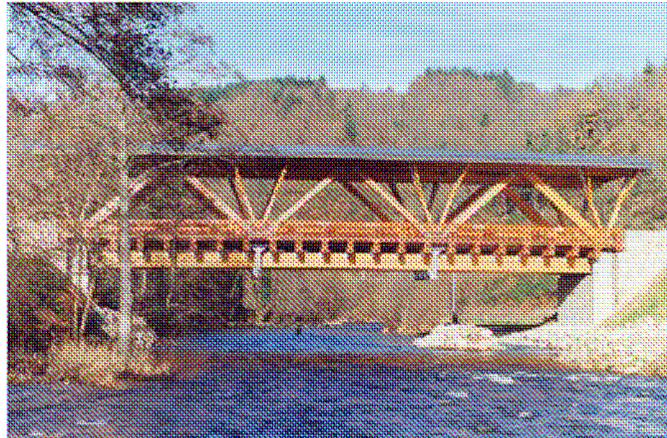
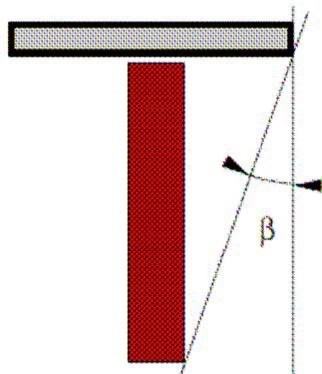


# Caractéristiques de conception du bois

---

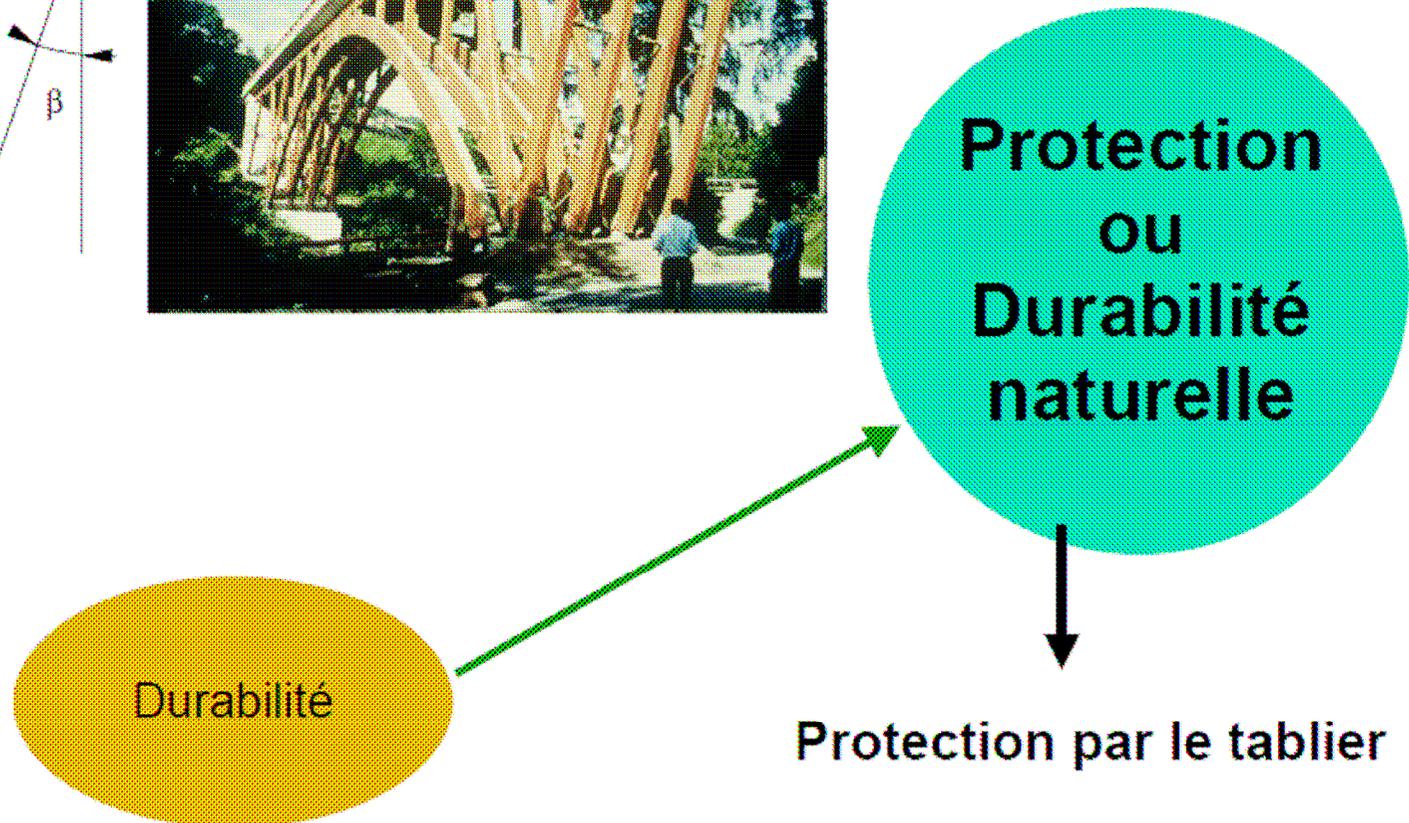
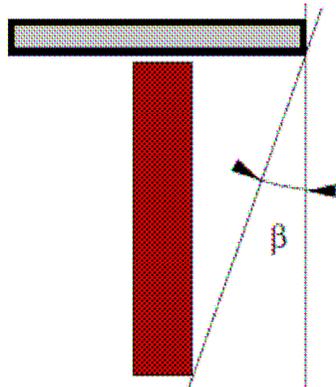


# Caractéristiques de conception du bois

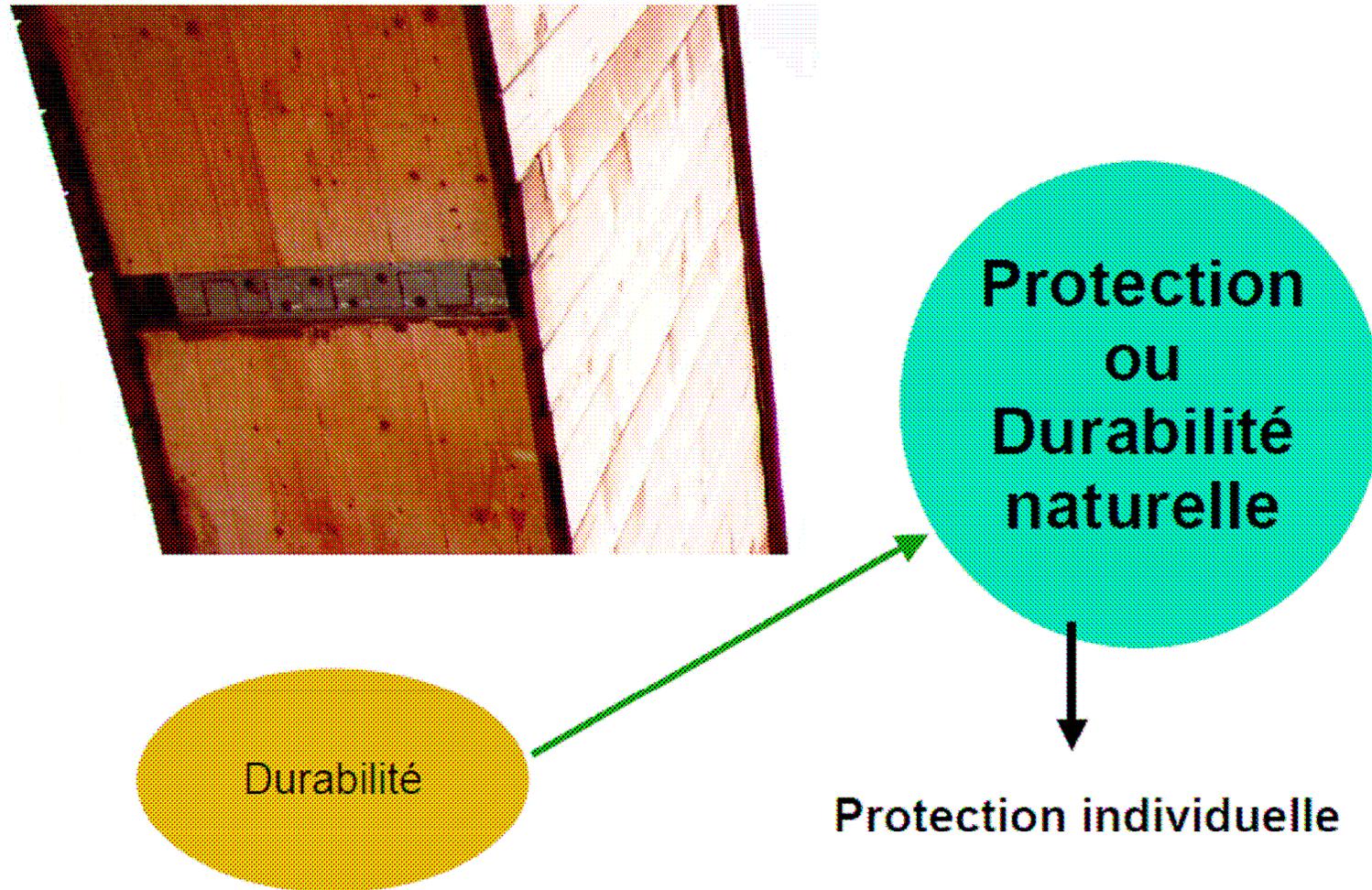


Protection par un toit

# Caractéristiques de conception du bois

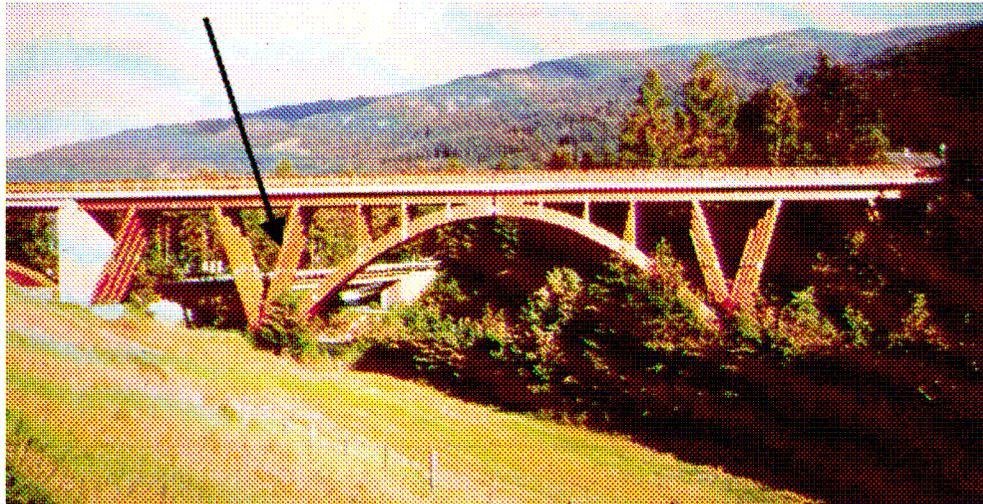


# Caractéristiques de conception du bois



# Caractéristiques de conception du bois

Pas de piège à eau + ventilation



Durabilité

Protection  
ou  
Durabilité  
naturelle

Durabilité naturelle  
+  
Conditions réunies

# Caractéristiques de conception du bois

Pas de piège à eau + ventilation



Durabilité

Protection  
ou  
Durabilité  
naturelle

Conditions réunies,  
Y compris pour les  
assemblages

# *Présentation d'un pont-type*



# Présentation d'un pont-type

## Contexte

### Groupe de travail regroupant :

Le Sétra (Division des Grands Ouvrages)

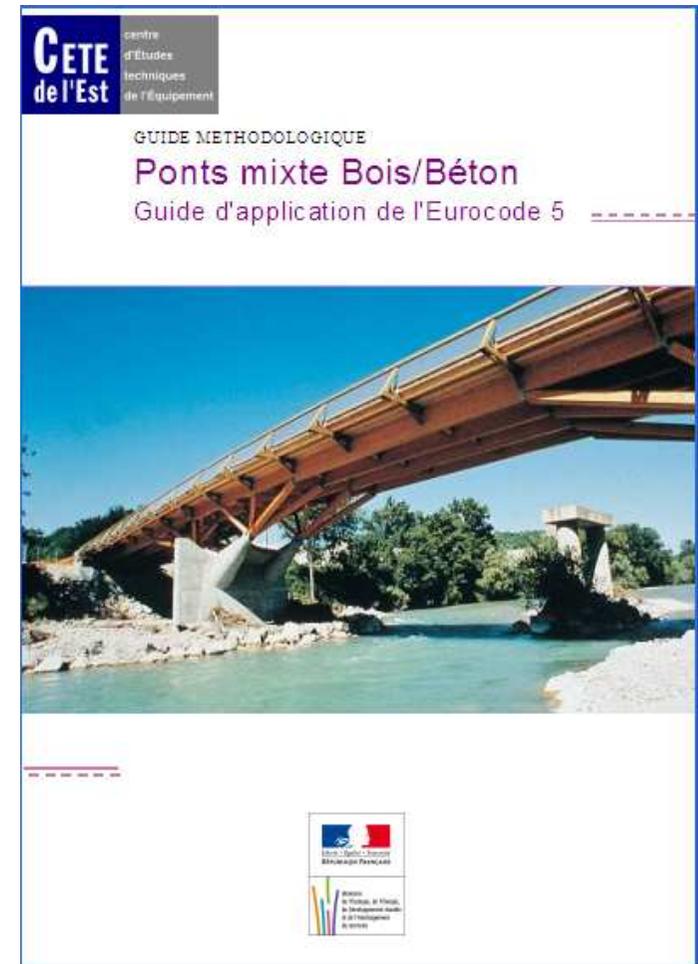
Le Cete de l'Est (Division Ouvrages d'Art et Labo)

L'ENSTIB

Le LCPC (ENPC/LAMI)

GT créé fin 2008

Document final en 2012...



# Présentation d'un pont-type

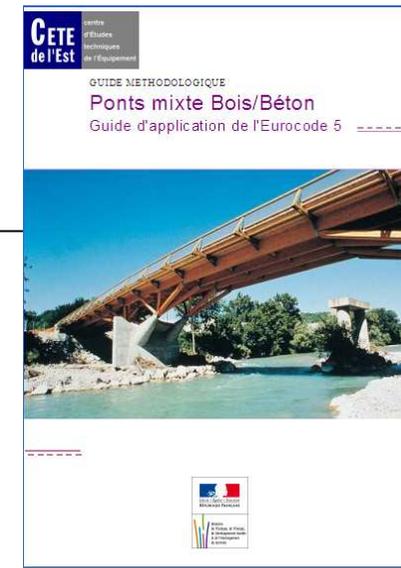
## Contexte

### Contenu du futur guide

- Présentation
- Conception générale
- Conception détaillée
- Exécution du tablier
- Règlements et hypothèses de calcul
- Modélisation et dimensionnement du tablier

### Note de calcul détaillée avec renvoi aux Eurocodes

### N'est traité que le pont à poutres



c) Modèle de trafic LM1

Le modèle LM1 est composé d'une charge répartie (UDL, Uniform Distributed Load) correspondant à la mobilisation du trafic sur l'ensemble de la chaussée, et d'un tandem d'essieu (TS, Tandem System) sur chaque voie, modélisé par quatre forces ponctuelles représentant la charge supportée par un poids lourd par la circulation.

La charge répartie se calcule de la manière suivante :

$$UDL = \alpha_{L1} Q_k$$

Les charges ponctuelles se calculent avec la formule suivante :

$$TS = \alpha_{L2} Q_k$$

TS représente la charge d'un essieu, soit deux roues dont les entrées correspondent à la mobilisation d'un essieu. Les surfaces de contact de ces forces ponctuelles sont de 0,40m x 0,40m et correspondent aux surfaces de contact entre les pneus du poids lourd et la chaussée.

Figure 3-3 : Découpage de la chaussée en voies

Figure 3-4 : Modélisation du modèle TS

Emplacement	Tandem TS		Système UDL	
	Charges d'essieu Q <sub>k</sub> (kN)	W (m) [W] (m)	W (m) [W] (m)	W (m) [W] (m)
Voie 1	300	2	2	2
Voie 2	200	2	2	2
Voie 3	100	2	2	2
Autres voies	0	2	2	2
Aire résiduelle (q <sub>0</sub> )	0	2	2	2

Tableau 3-2 : Charges engendrées par le trafic

Classe de trafic	D <sub>01</sub>	D <sub>02</sub> (20)		D <sub>03</sub>	D <sub>04</sub> (20)	D <sub>05</sub>
		1	2			
1	1	1	1	1,2	1,2	1
2	0,8	0,8	0,7	1	1	1

Tableau 3-3 : Coefficients de chargement

Ces coefficients dépendent du numéro de voie et de la classe de trafic du pont.

EV 199-2  
PARTIE 2  
TABLEAU 4.2

EV 199-2  
PARTIE 2  
TABLEAU 4.2

EV 199-2 NA  
CLASSE 4.2(2)  
NOTES 4.2.1

### 5.3 - Vérification du fretage sur appuis

Comme dit précédemment, le bois travaille très mal en compression transversale ce qui limite l'intensité des efforts à transmettre  $f_{t,90} (G2.2S) = 3 \text{ MPa}$ .

Il peut être alors envisagé de renforcer localement les poutres en bois par des frettes chargées de reprendre à elle seules la réaction d'appui et les transmettre sur la hauteur de la poutre (voir page 34 - Vérification des poutres bois en compression transversale).

La transmission de la réaction d'appui par la vis VB

$$(0) R_{t,90} = 0,56 \cdot \sqrt{d} \cdot f_{t,90} \cdot \rho^{0,5}$$

$$(1) R_{t,90} = k_1 \cdot N_{t,90}$$

$$k_1 = 1 \quad \text{for } \bar{\lambda} \leq 0,2$$

$$k_1 = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{for } \bar{\lambda} > 0,2$$

$$N_{t,90} = \frac{A_{frette} \cdot f_{t,90}}{f_{t,90}} \quad \text{avec } f_{t,90} = 1$$

$$(2) N_{t,90} = \sqrt{c_1 \cdot E_t \cdot I_t}$$

$$c_1 = \frac{10,22 + 0,014 \cdot d}{1,17 \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$I_t = \frac{\pi}{64} \cdot (0,7 \cdot d)^4$$

$$(3) \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{t,90}}{N_{t,90,c}}}$$

d'après (1) et (2)

$$K = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$R_{t,90} = \min(R_{t,90,1}, R_{t,90,2}) \text{ d'après (2) et (3)}$$

$$k_{t,90} = 1,75 \text{ pour BLC et LIT, si } h > 300 \text{ mm}$$

EV 199-2-2  
PARTIE 2-2  
TABLEAU 5.4

# Présentation d'un pont-type

Ouvrage type « poutres sous chaussées »

Poutres principales en lamellé-collé GL28h

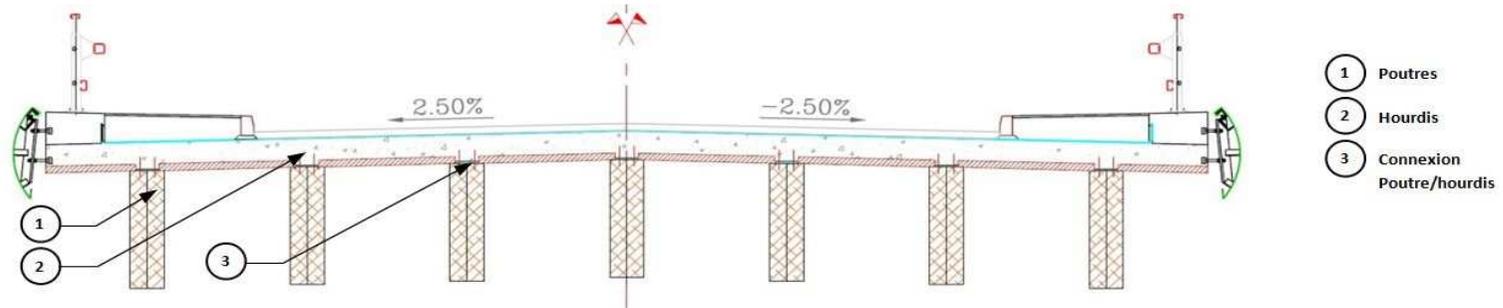
Hourdis en béton armé « classique », béton haute performance ou béton fibré ultra performant

Ensemble poutres/hourdis connecté



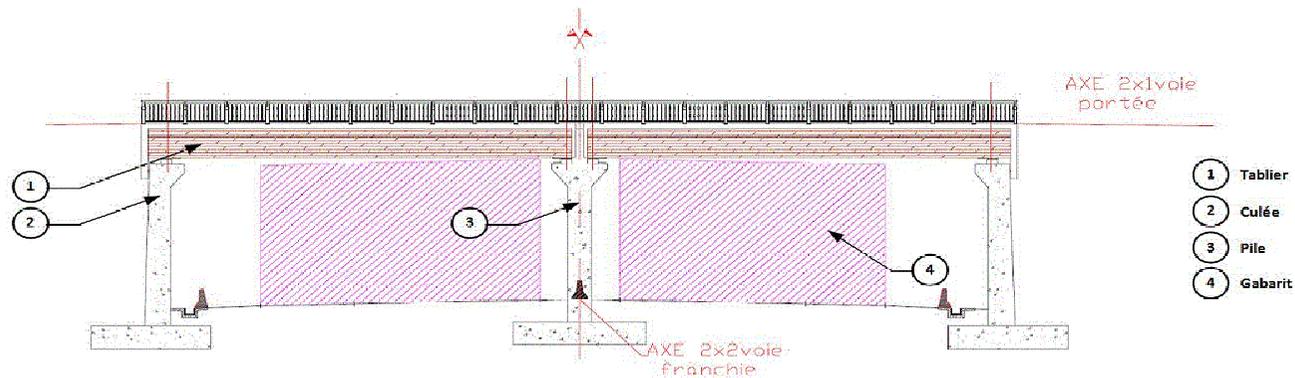
# Présentation d'un pont-type

## Coupe transversale



Entraxe des poutres de 0,8 à 1,5 m

## Coupe longitudinale



Gabarit sous poutres de 6,15 m du fait de la relative fragilité de la structure au chocs des véhicules

# Présentation d'un pont-type

---

## Durée d'utilisation

Conformément à l'Eurocode la durée d'utilisation du projet pour les ponts en bois est de 100 ans.

## Neige et vent

Conformément à l'Eurocode 1. Les charges de neige ne sont en général pas dimensionnantes pour les ponts routiers.

## Classe d'exposition pour le béton

Les critères sont les mêmes que pour les autres types de pont.

## Classe d'exposition pour le bois

La conception de l'ouvrage est pensée pour que la partie bois soit protégée des intempéries. On se situe en classe de service 2 et en classe d'emploi 3.

## Trafic

Pour l'exemple du guide l'ouvrage est de classe 2, sans limitation de tonnage.



# Présentation d'un pont-type

---

## Elancement

1/15 pour des travées isostatiques

Jusqu'à 1/20 avec une dalle en BHP

## Dalle

Béton C35/45  $e=22$  cm

Béton C60/75  $e=15$  cm

BFUP dalle gaufrée  $e=20$  cm (ép. équivalente 8.5 cm)

Si dalle BA ou BHP : dalle coulée en place par l'intermédiaire de coffrages perdus.

Si dalle BFUP : dalle préfabriquée en usine.

# Présentation d'un pont-type

## Poutres en bois

Poutres en bois lamellé collé de nuance GL28h.

Fabrication en usine avec des sections standards longueur jusqu'à 45 m.

Section rectangulaire constante ou plus rarement variable.

Épaisseur des lamelles (mm) : 30, 33,3, 33,5, 35, 45

Largeur standard (mm) : 90, 115, 140, 160, 185, 210

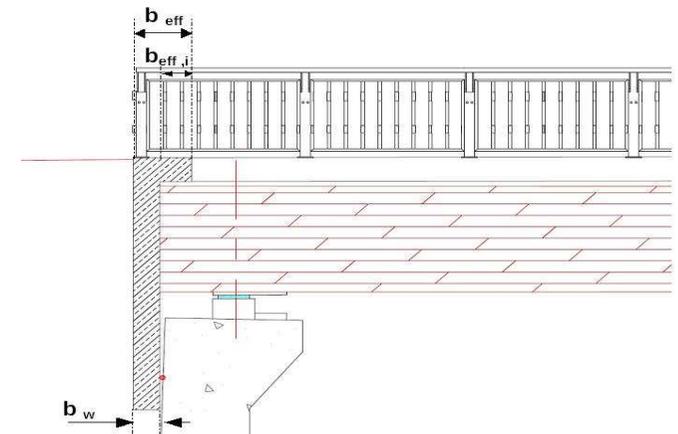
Hauteur : variable jusqu'à 2 m environ

Pour obtenir des poutres de largeur supérieure à 210 mm il est possible d'accoler des éléments en les liaisonnant avec des broches et des boulons

## Entretoisement

Pas d'entretoise intermédiaire

Entretoises d'abouts réalisées avec la retombée de dalle



# Présentation d'un pont-type

---

## Bois

GL28h

$f_{m,g,k}=28$  MPa ;  $f_{v,d}=3,2$  MPa ;  $f_{vg,k}=3$  MPa ;  $E_{0,g,mean}=12600$  MPa

## Acier

Platines métalliques, broches : S355

Goujons : S 235

Dalle : HA Fe 500

## Béton

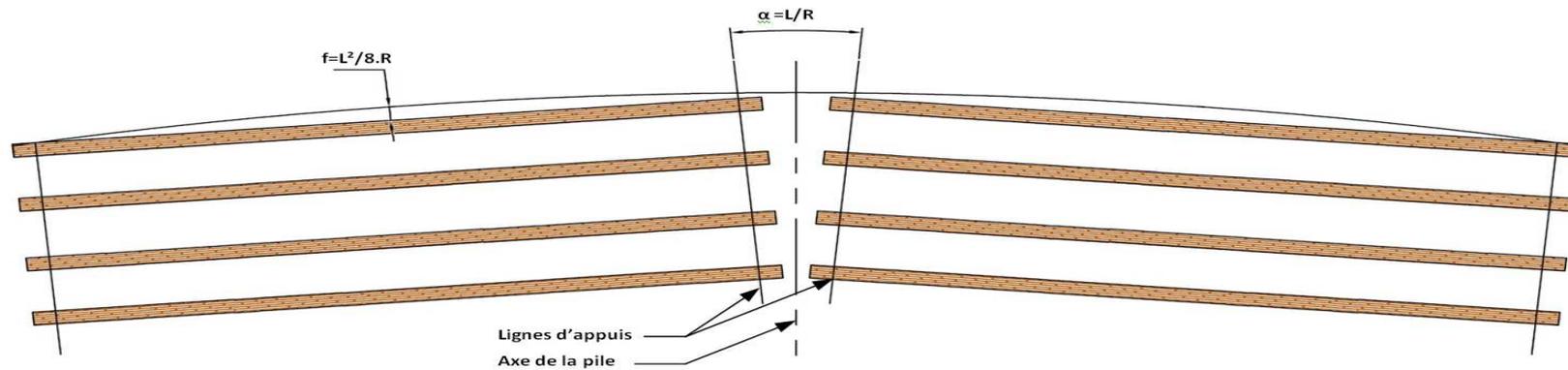
Dalle armée C35/45 ou C60/75, ou dalle BFUP  $f_{ck} \square 150$  MPa

# *Dispositions constructives*

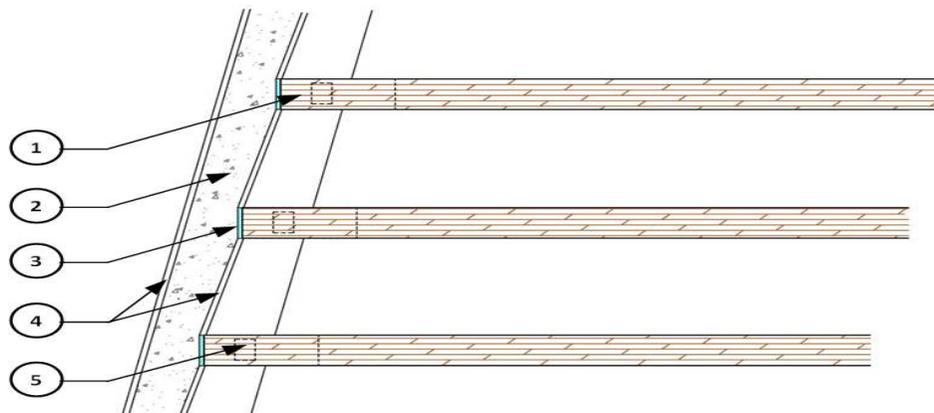


# Dispositions constructives

## Courbure



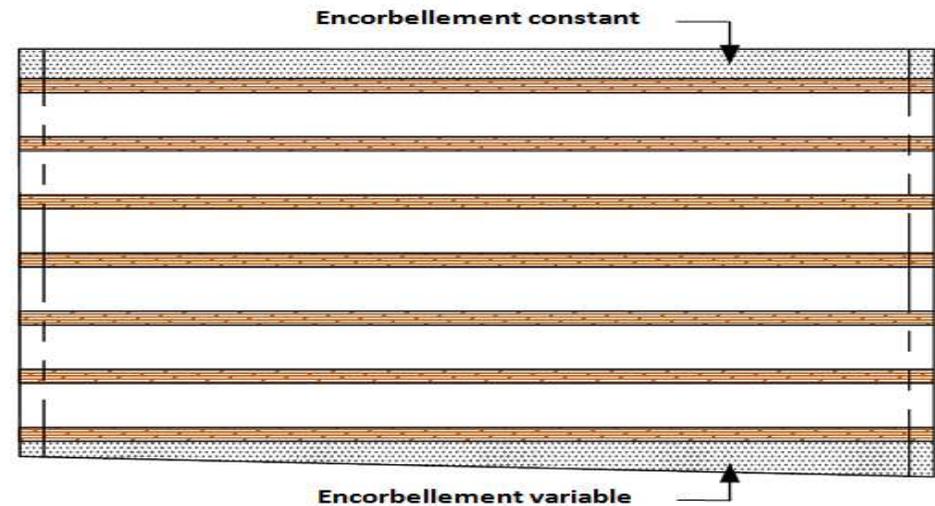
## Biais



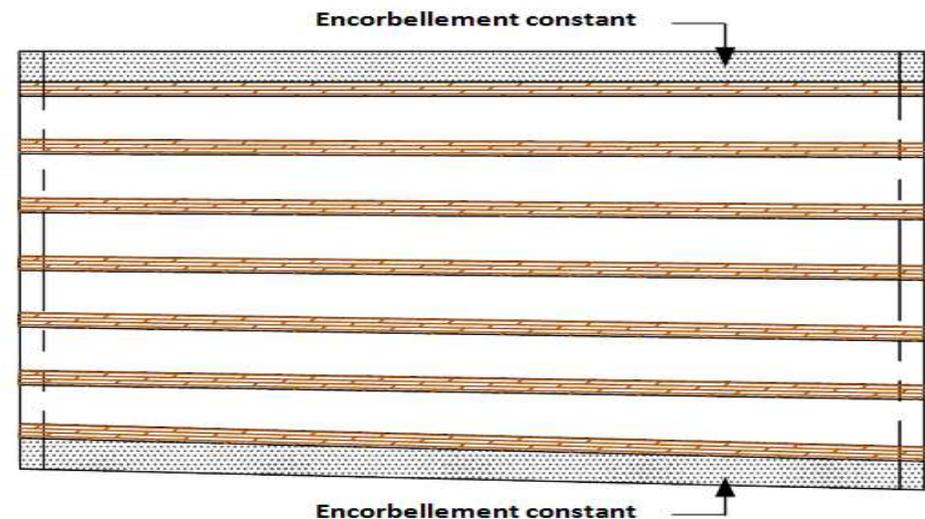
- 1 Poutre
- 2 Retombée de dalle
- 3 Connexion poutre/hourdis
- 4 Coffrage
- 5 Appuis

# Dispositions constructives

Élargissement par le hourdis en encorbellement



Élargissement par une disposition des poutres en éventail



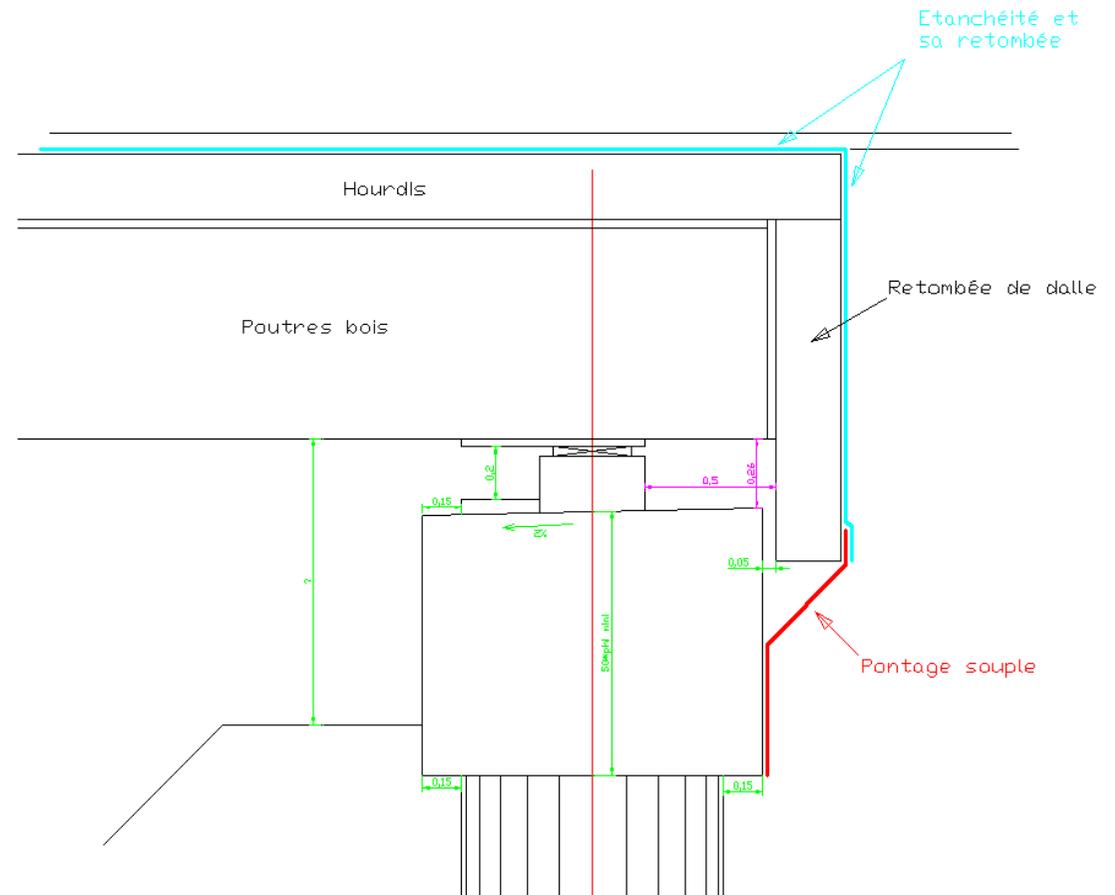
# Dispositions constructives

## Appareils d'appui

Un appareil d'appui en élastomère fretté est disposé sous chaque poutre.

## Vérinage

Un point de vérinage est placé sous chaque poutre afin de limiter les efforts parasites dans la tablier.



# Dispositions constructives

---

## Rôle des pièces de pont courantes

Les pièces de pont sont des éléments transversaux, généralement des poutres, qui sont connectées au hourdis en béton et aux poutres en bois. En zone courante, pour les ponts à poutres multiples, les entretoises contribuent à la répartition des efforts entre les différentes poutres et permettent de transmettre les charges locales (poids de la dalle, des équipements, des surcharges, du vent) aux poutres porteuses.

Compte-tenu des portées de franchissement, de l'encastrement des poutres aux extrémités et de manière continue par la dalle, la solution adoptée ne comprend pas d'entretoises intermédiaires.

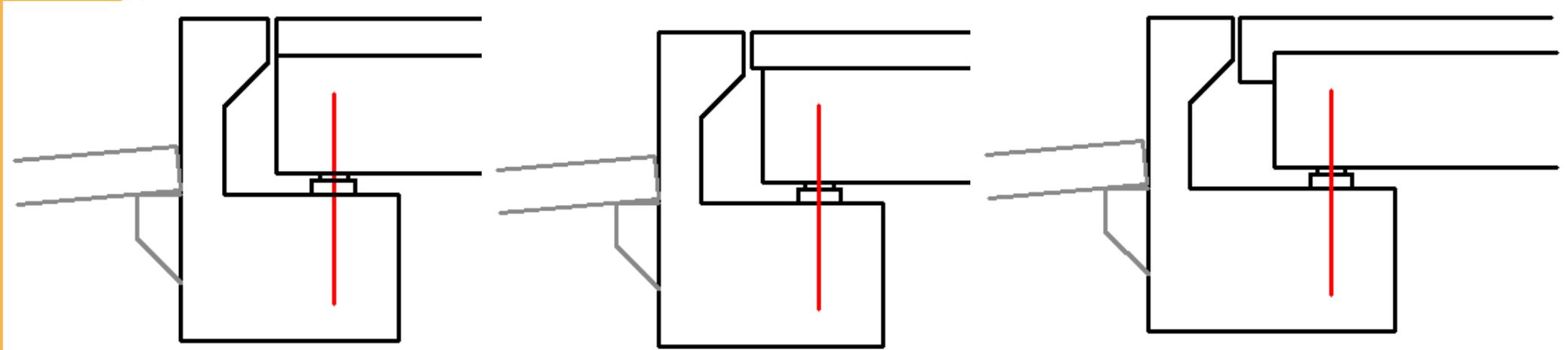
## Rôle des pièces de pont sur appuis

Le rôle des pièces de pont situées au droit des appuis est particulier, il assure les rôles suivants :

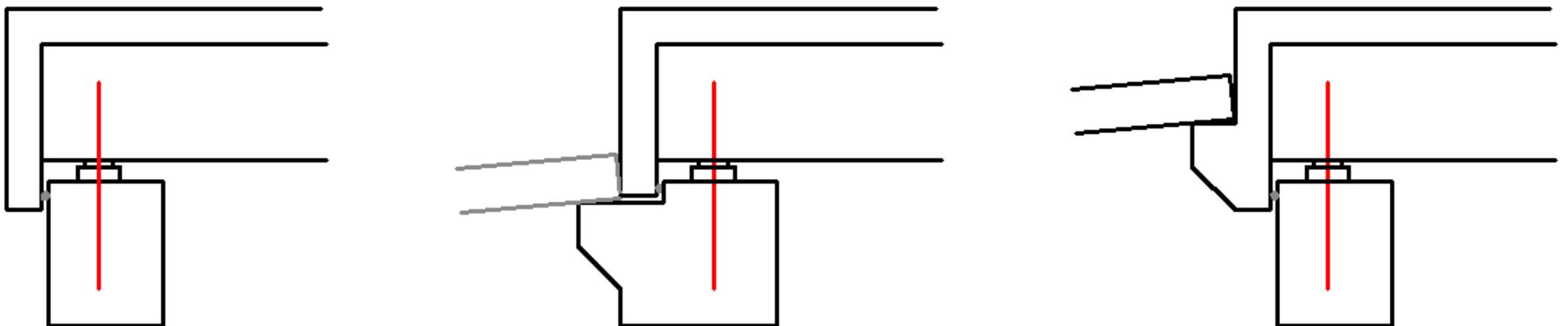
- Assurer aux poutres porteuses un encastrement en torsion ;
- Renforcer localement la dalle en offrant un appui solide aux poids lourds arrivant sur l'ouvrage ;
- Diffuser les réactions d'appuis de vérinage et équilibrer les efforts de flexion induits, lorsque le vérinage est prévu sous la pièce de pont ;
- Contribuer à la transmission des efforts horizontaux appliqués au tablier, principalement le vent, aux appuis.

# Dispositions constructives

Protection par simple avancée de la dalle => joint de chaussée



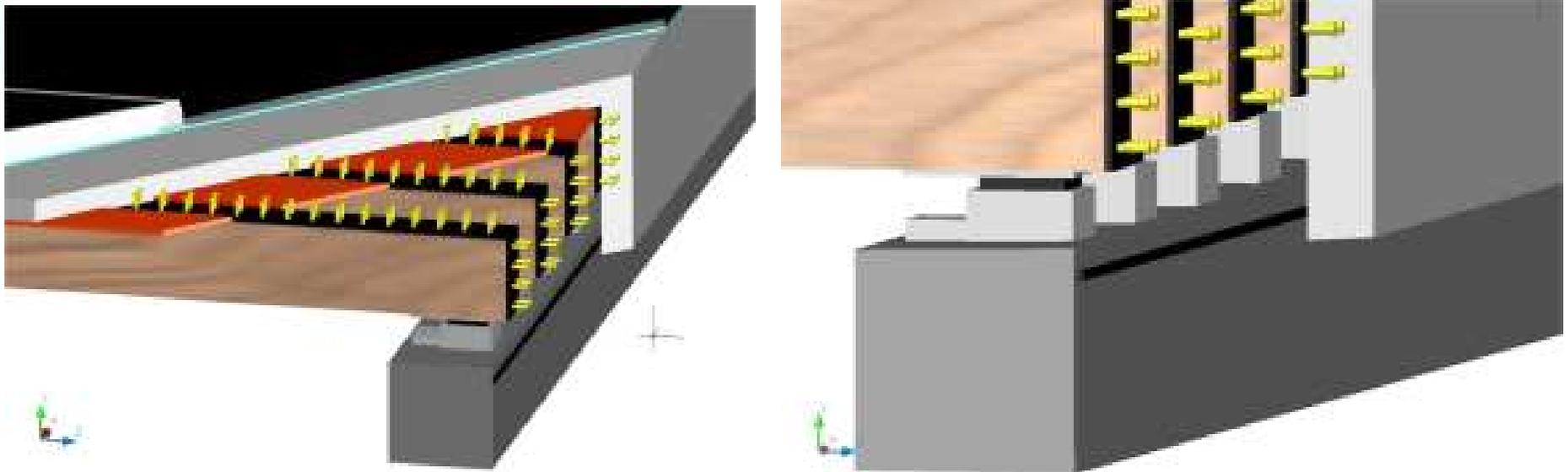
Protection par retombée de dalle => pont semi-intégral



# Dispositions constructives

---

## Conception adoptée pour les pièces de pont du pont à poutres bois/béton



Les raisons de ce choix sont multiples, car ils permettent :

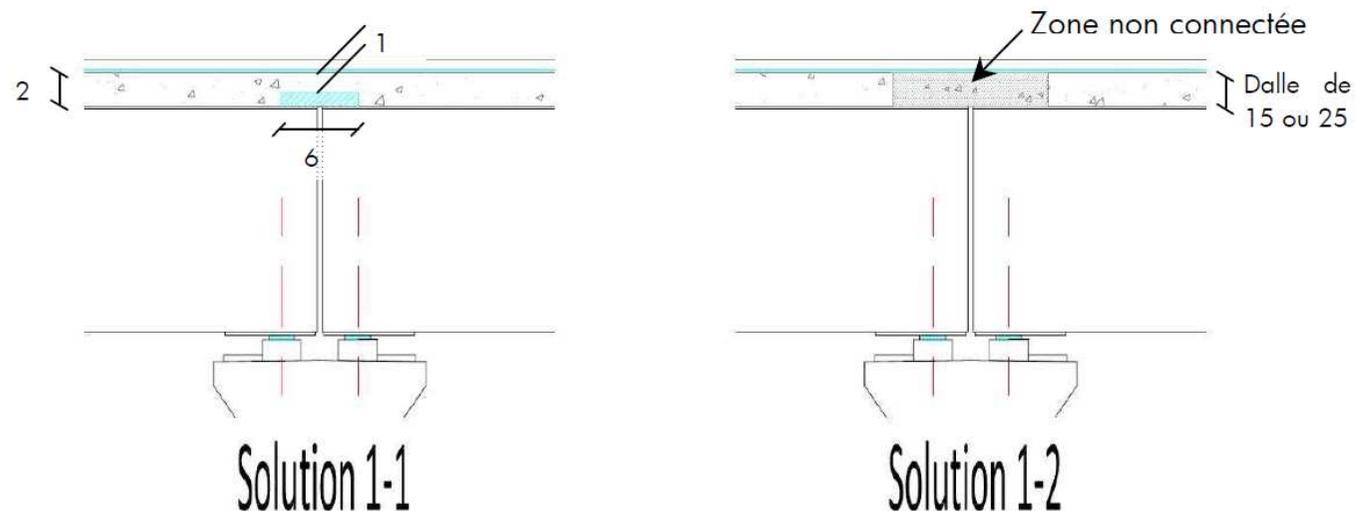
- .De simplifier les assemblages entre les poutres porteuses et les pièces de pont ;
- .D'éviter l'emploi de joints de chaussée ;
- .D'assurer aux poutres porteuses une bonne protection vis à vis d'éventuelles venues d'eau.

# Dispositions constructives

## Continuité sur piles

### ▪ Système à « entretoises »

Le système d'encastrement en torsion sur pile est assuré par des entretoises entre chaque poutre en bois dans l'alignement des appuis. Pour une raison de rigidité, ces entretoises seront en métal (profilée en I) ou en béton. Ces entretoises seront liaisonnées aux poutres par l'intermédiaire de connecteurs type tire-fonds et à la dalle par des goujons.

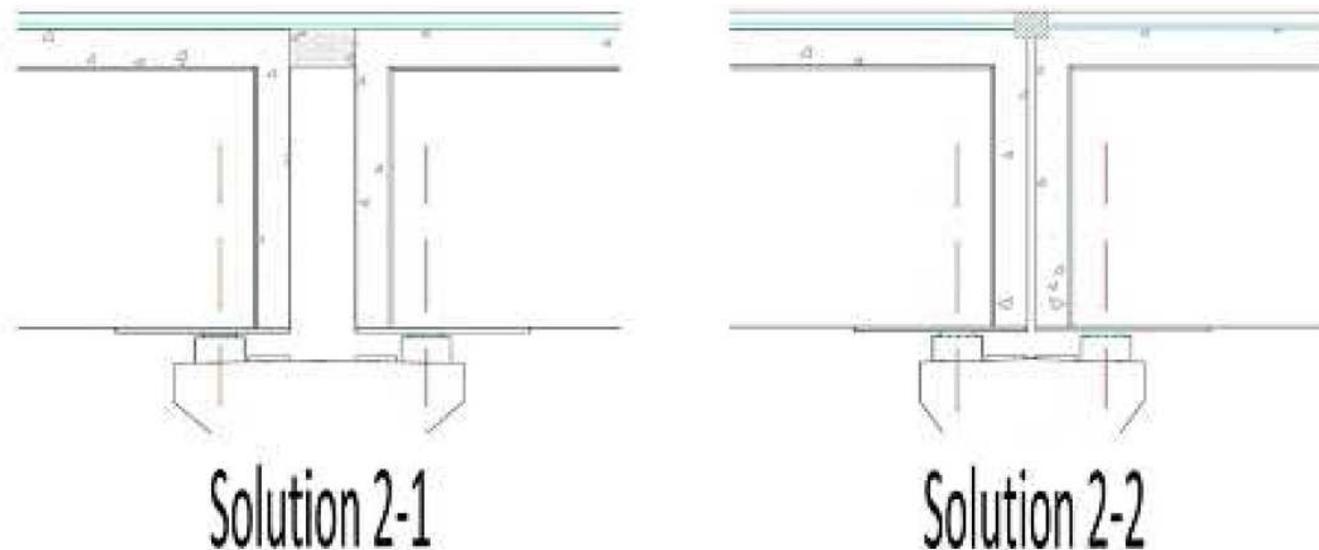


- **Solution 1-1** : Section rétrécie de la dalle par un coffrage résistant et du polystyrène ;
- **Solution 1-2** : Continuité du hourdis par une partie de dalle non connectée aux poutres en bois. Le maintien est assuré par le ferrailage longitudinal.

# Dispositions constructives

## ▪ Système à « retombée de dalle »

Le système d'encastrement en torsion sur pile est assuré de la même manière que sur culées par un système d'about de pont semi-intégral.



- **Solution 2-1** : Continuité de la dalle par une dalle de transition. Le maintien est assuré par le ferrailage longitudinal ;
- **Solution 2-2** : Mise en place d'un joint de chaussée.

# *Hypothèses de calculs*



# Hypothèses de calculs

## 5 Propriétés des matériaux :

### 5.1 Bois GL28h pour les poutres :

EN1194 - Tableau 1			
Classe de résistance		GL28h	
Résistance en flexion	$f_{m,g,k}$	28	MPa
Résistance en traction axiale	$f_{t,0,g,k}$	19.50	MPa
Résistance en traction perpendiculaire	$f_{t,90,g,k}$	0.45	MPa
Résistance en compression axiale	$f_{c,0,g,k}$	26.50	MPa
Résistance en compression perpendiculaire	$f_{c,90,g,k}$	3.00	MPa
Contrainte de cisaillement	$f_{v,g,k}$	3.20	MPa
Module d'élasticité axial	$E_{0,g,moy}$	12600	MPa
Module d'élasticité axial fractile à 5%	$E_{0,g,0.05}$	10200	MPa
Module d'élasticité transversal	$E_{90,g,moy}$	420	MPa
Module de cisaillement	$G_{,g,moy}$	780	MPa
Masse volumique caractéristique	$\rho_{g,k}$	410	kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique moyenne	$\rho_m$	470	kg/m <sup>3</sup>

### 5.2 Béton de la dalle

*Béton C35/45 pour la dalle BA :*

$$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 3.2 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 34\,000 \text{ MPa}$$

$$\rho_c = 25 \text{ kN/m}^3$$

# Hypothèses de calculs

---

## 6 Actions :

### 6.1 Poids-propre

- Poutres bois : selon dimensions
- Hourdis :  $e_p = 25 \text{ cm}$ ,  $\rho = 25 = \text{kN/m}^3$
- Panneau coffrant : à définir

### 6.2 Equipements :

- Terre végétale et remblai sous chaussée :  $e_p = 30 \text{ cm}$  ;  $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$
- Complexe étanchéité et drainage :  $e_p = 20 \text{ cm}$  ;  $\rho = 24 = \text{kN/m}^3$
- Corniche :  $0.5 \text{ kN/ml}$
- Palissade bois + poteaux métal :  $2.0 \text{ kN/ml}$

### 6.3 Surcharges routières :

LM1 (UDL+TS) sur la largeur roulable de l'ouvrage.  
Surcharges de foule en accompagnement sur les trottoirs.

### 6.4 Retrait du béton :

Calculé selon l'EC2

### 6.5 Hydrométrie du bois :

Gain d'humidité de 5% (de 12 à 17%)

Nota : Le gain d'humidité se fait sur la périphérie de la poutre (3 à 4 cm sur les faces exposées). On peut ainsi considérer que l'effet du gain d'humidité du bois périphérique est équilibré par le bois à cœur.

### 6.6 Température :

Gradient de +/-10°C entre le hourdis et les poutres

### 6.7 Charge de fatigue :

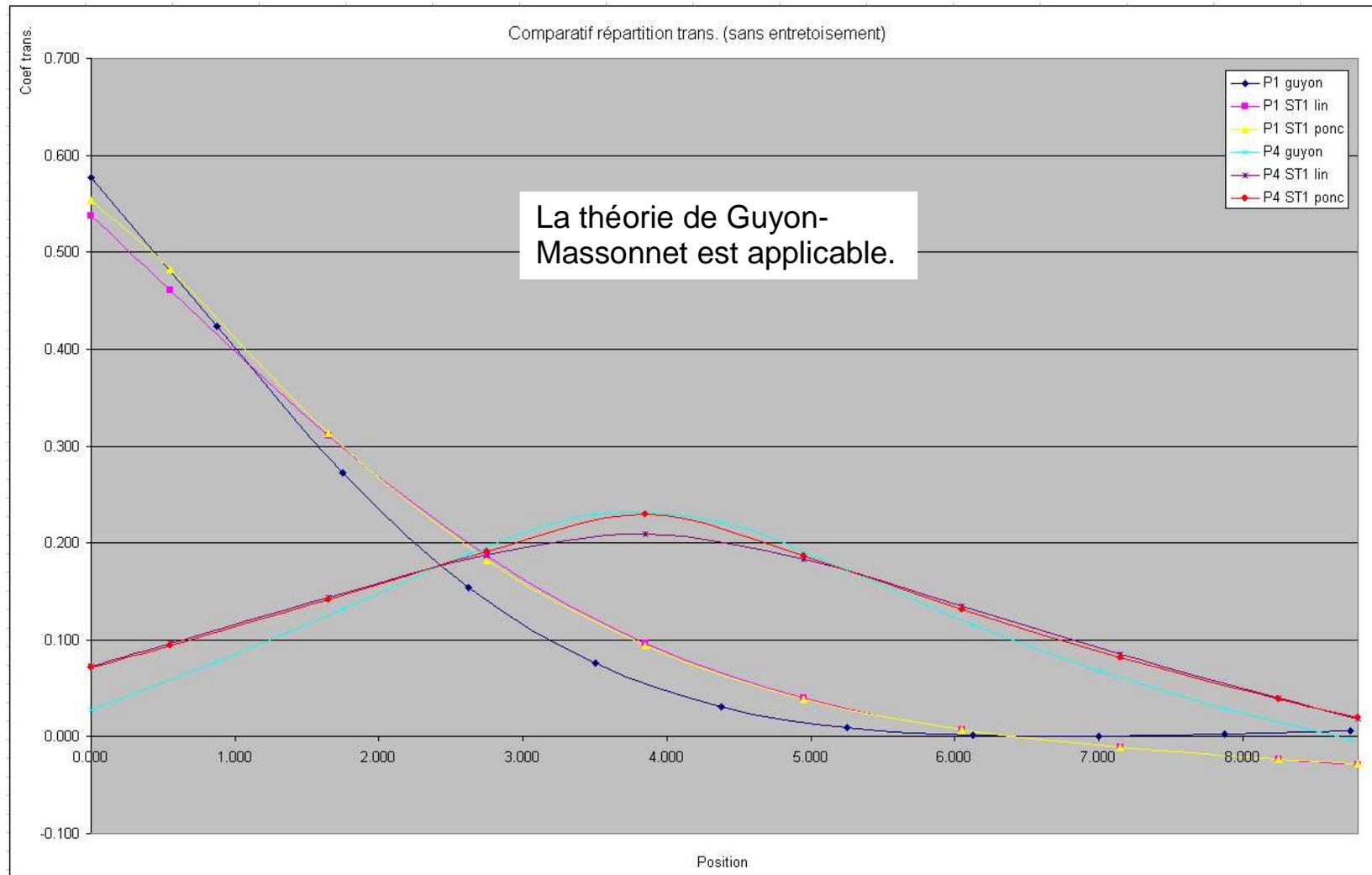
Les charges de fatigue sont à considérer dans le cas d'ouvrages routiers.

# Hypothèses de calculs

Nous avons estimé la répartition transversale selon 2 modèles :

Feuille de calcul selon la théorie de Guyon-Massonnet ;

Modèle 3D sous ST1 (grille de poutres) avec répartition sous charges ponctuelles et linéiques.



# *Assemblages bois / béton*



# Assemblages bois / béton

---

## Pourquoi connecter ?

- Participation du hourdis à la reprise des efforts (flexion sous superstructures et surcharges)
- Diminution de la hauteur des poutres en lamellé-collé
- Gain d'environ 30 à 35% sur le volume de bois (EPOA OA5 rocade de Strasbourg)

## Comment connecter ?

- Collage,
- Embrèvement,
- Organes métalliques...

## Contraintes ?

- Durée de vie,
- Coût, facilité de réalisation,
- Liberté d'emploi (brevet)...



# Assemblages bois / béton

Solution 1



Une liaison assurée par une série d'encoches transversales offre une bonne raideur. En effet, la transmission de l'effort de cisaillement se fait par compression de la dalle sur les faces latérales du bois en bout et par adhérence. Le maintien de la dalle se fait par le poids propre de la dalle.

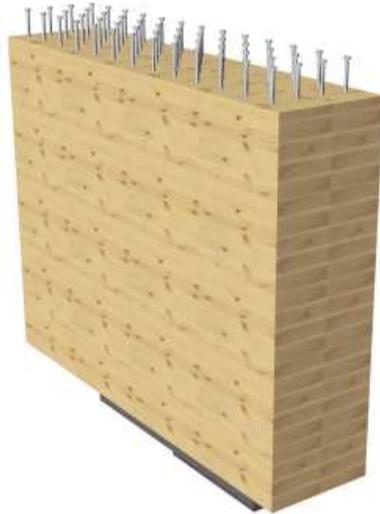
Solution 2



La liaison est assurée par les tubes scellés par collage dans les poutres. Les poutres sont percées en usine, et l'espace entre le bois et les tubes est comblées par une résine.

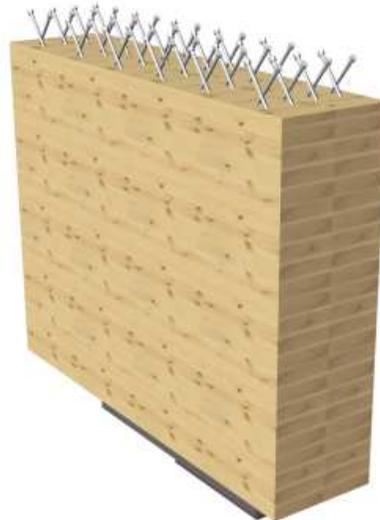
# Assemblages bois / béton

Solution 3



La liaison est ici assurée par l'intermédiaire de tire-fonds inclinés. Ces organes semblent montrer des valeurs de raideur intéressantes.

Solution 3bis



De plus, leur inclinaison les fait travailler principalement en traction et en cisaillement. Ils offrent ainsi des valeurs de raideur plus élevées qu'avec les tire-fond verticaux.

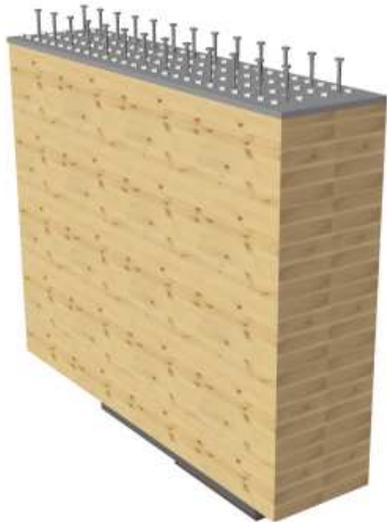
# Assemblages bois / béton

Solution 4



Un demi-profilé métallique en T est pris en sandwich et liaisonnés aux poutres bois par une série de broches transversales disposées tout le long des poutres. Ce type de liaison est plus performant en termes de rigidité dans la mesure où on multiplie les plans de cisaillement de l'organe par le nombre de plans cisailés. Si notre poutre principale est constituée de quatre poutres liaisonnées à deux profilés en T, cela revient à multiplier la capacité résistante de l'organe par 4.

Solution 5



Une platine métallique est placée entre la poutre bois et la dalle en béton. Elle est liaisonnée au bois par des tire-fonds et au béton par des goujons mécano-soudés. La raideur de l'assemblage est donnée par le nombre de tire-fonds associés à chaque goujon. La platine métallique apporte peu d'inertie à la l'ensemble poutre/dalle.

# Assemblages bois / béton



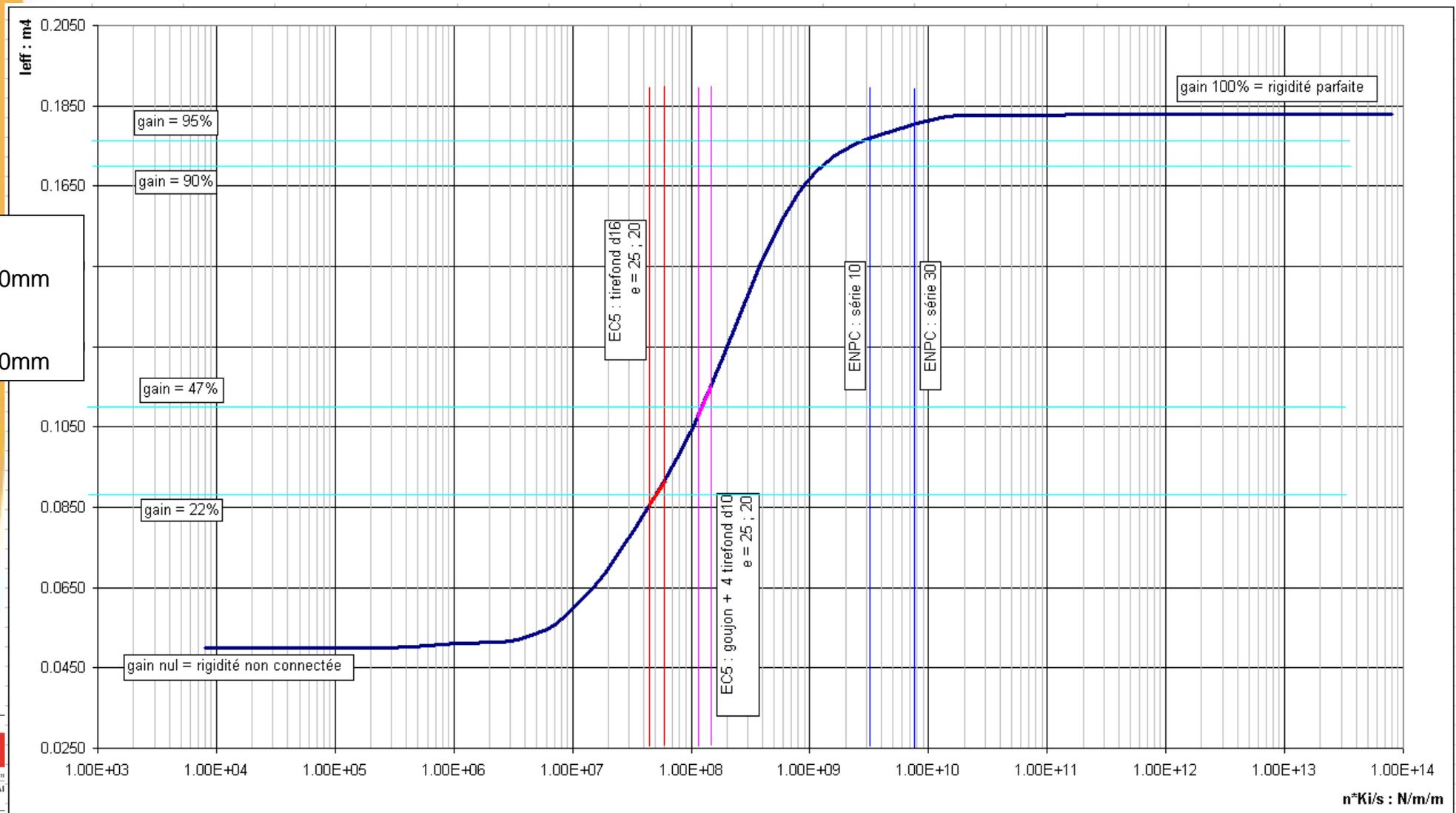
Présentation des corps d'essais ENPC :

- Tirefond diam. 16
- Tirefond diam. 16 renforcé par rondelles
- Plaque, goujons diam. 16, tirefonds diam. 10



# Assemblages bois / béton

## Inertie d'une poutre mixte selon la méthode de Heimeshoff



Poutre :  
1200\*320mm  
Hourdis  
250\*1100mm

# *Fonctionnement mixte avec rigidité imparfaite*



# Fonctionnement mixte

- La connexion parfaite n'existe pas.
- Calcul de la rigidité/inertie, des contraintes est à selon la théorie d'Heimeshoff (NF EN 1995, partie 1-1, annexe B)

(1) Il convient que la rigidité efficace en flexion soit prise selon :

$$(EI)_{\text{ef}} = \sum_{i=1}^3 \left( E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2 \right)$$

en utilisant les valeurs moyennes de  $E$  et où :

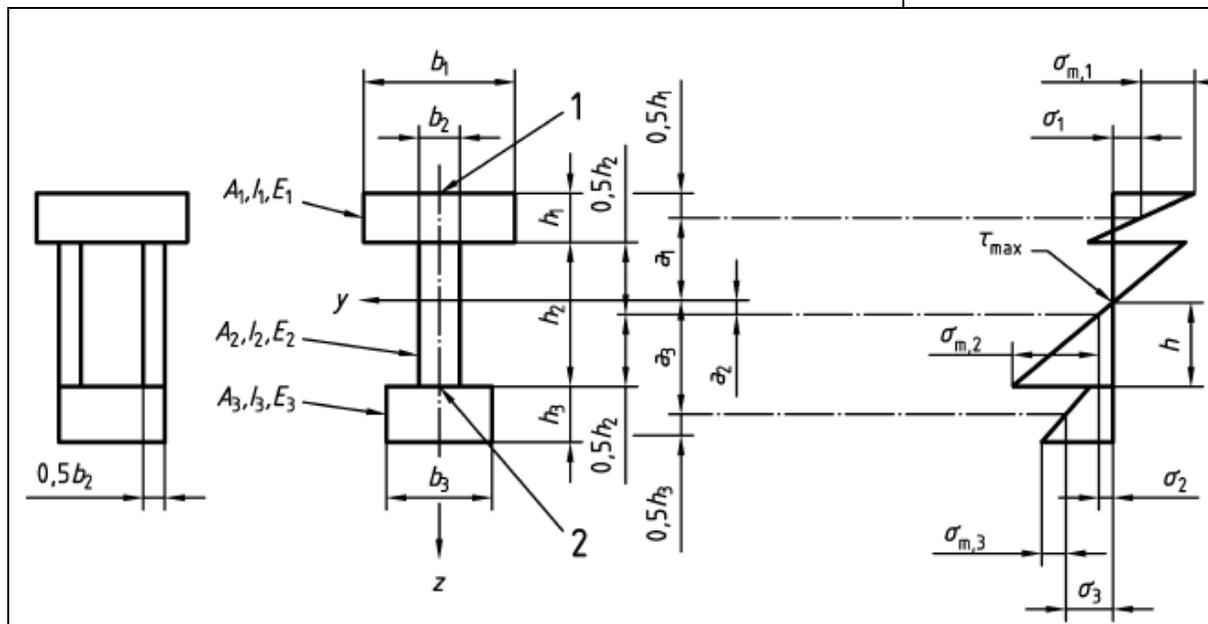
$$A_i = b_i h_i$$

$$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12}$$

$$\gamma_2 = 1$$

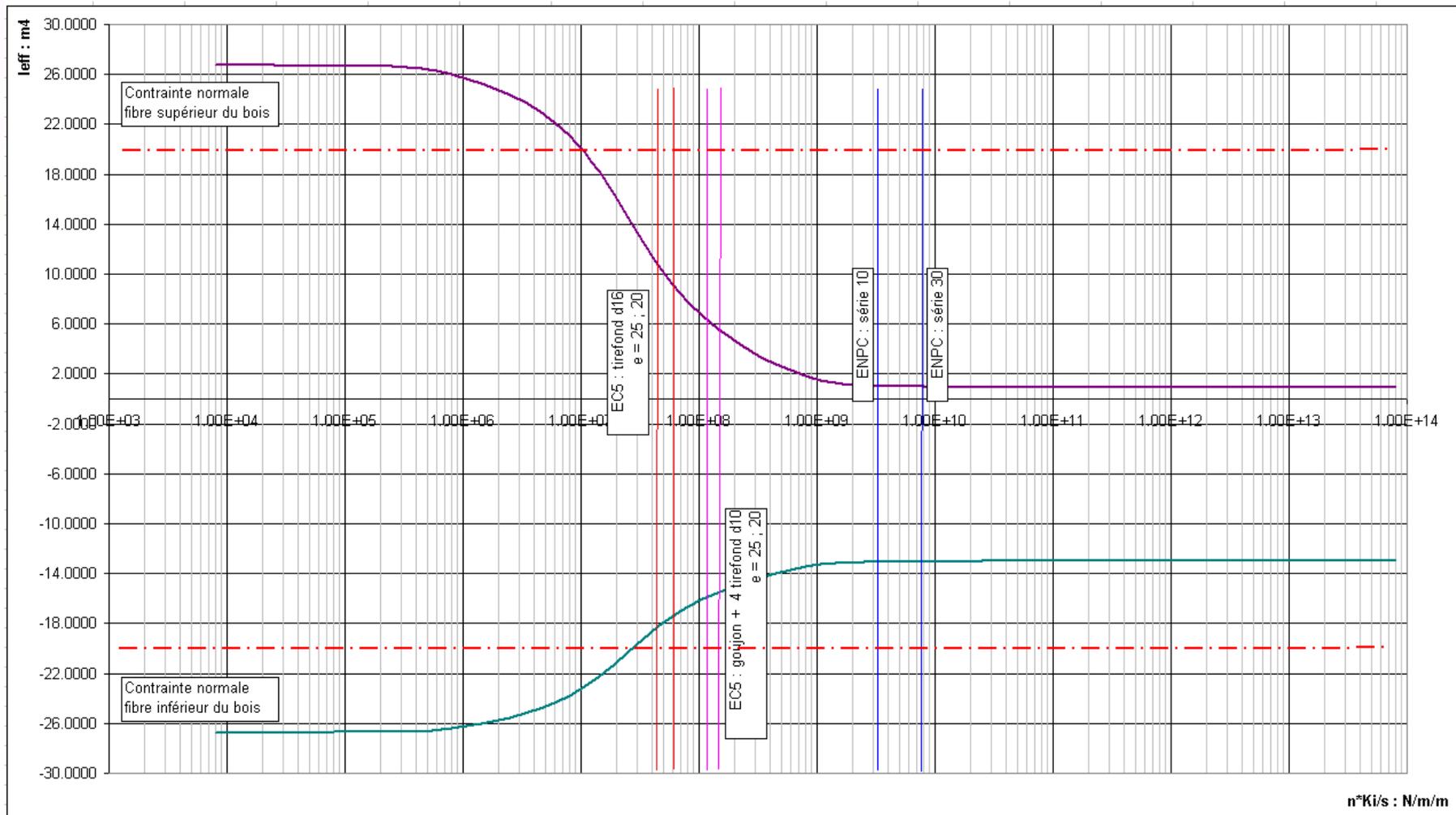
$$\gamma_i = \left[ 1 + \pi^2 E_i A_i s_i / (K_i I_i^2) \right]^{-1} \text{ pour } i = 1 \text{ et } i = 3$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum \gamma_i E_i A_i}$$



# Fonctionnement mixte

Variation des contraintes en fibre sup et inf dans la poutre bois, en fonction de la raideur d'assemblage



Cas d'une poutre avec une connexion bois/béton imparfaite : augmentation des contraintes en fibre inf

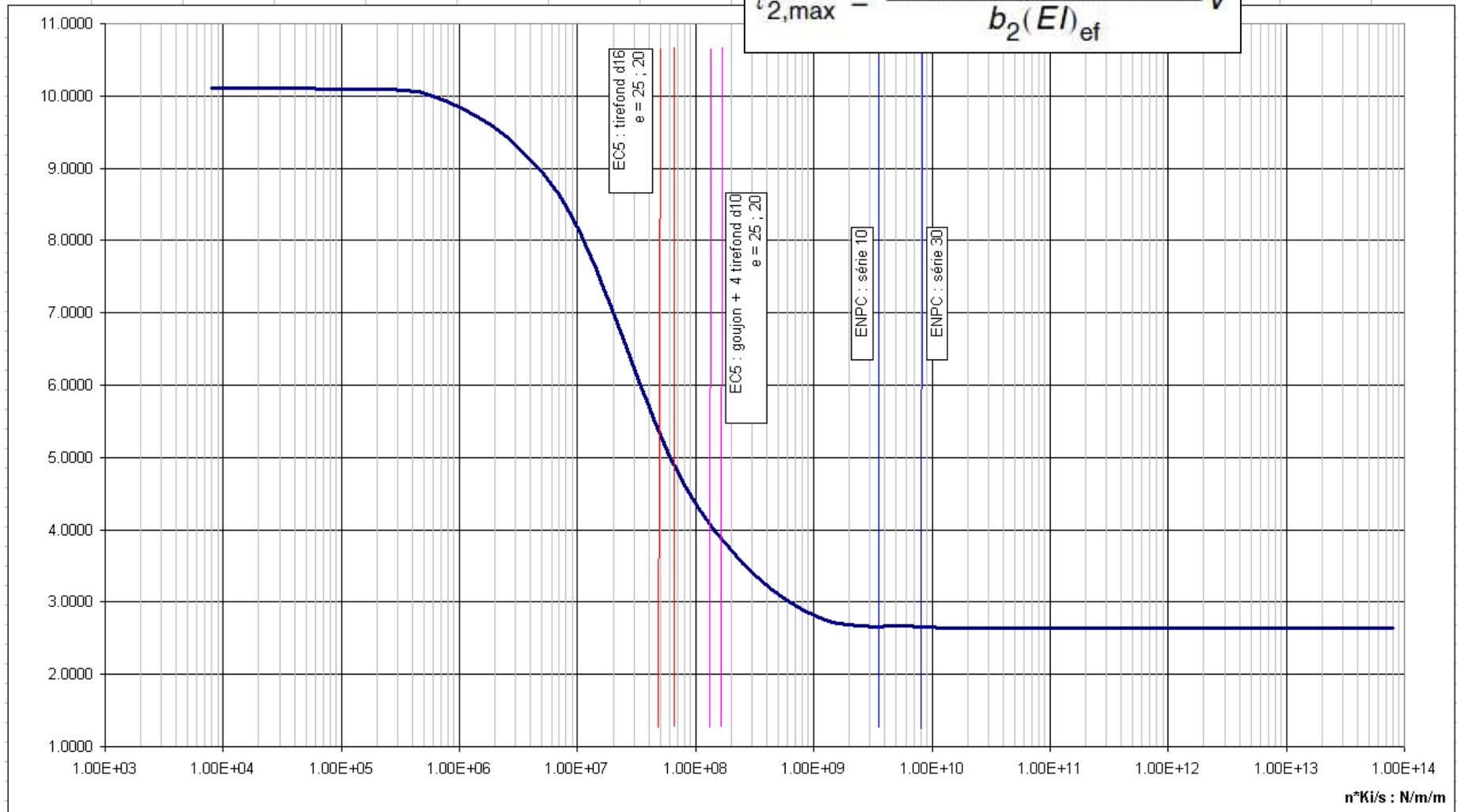
=> Risque de sous-dimensionnement

# Fonctionnement mixte

Variation du cisaillement dans la poutre bois, en fonction de la raideur d'assemblage

Erreur dans la formule B.9 de l'EC : remplacer h2 par h

$$\tau_{2,max} = \frac{\gamma_3 E_3 A_3 a_3 + 0,5 E_2 b_2 h^2}{b_2 (EI)_{ef}} V$$



# *Format des vérifications du bois*



# Format des vérifications du bois

---

Calcul aux États Limites :

- ELS : calcul des déformations ;
- ELU : calcul des efforts et des contraintes.

Particularités de l'Eurocode 5 :

- Calcul à l'état initial (mise en service) et à l'état final (à 100 ans) ;
- Calcul par type de chargement (durée).

Prise en compte du fluage des matériaux et des assemblages, ainsi que de l'endommagement lié aux charges.

# Format des vérifications du bois

---

Calcul aux États Limites Ultimes :

Facteur de modification  
de résistance

Valeur caractéristique

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}} * R_k}{\gamma_M} * k_{\text{geo}}$$

Facteur partiels pour  
les matériaux

Facteur géométrique

# Format des vérifications du bois

Facteur de modification de résistance :

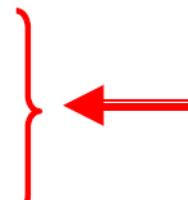
Endommagement du bois sous l'effet du chargement

Tableau 3.1 — Valeurs de  $k_{mod}$

Matériau	Norme	Classe de service	Classe de durée de chargement				
			Action permanente	Action long terme	Action moyen terme	Action court terme	Action instantanée
Bois massif	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Bois lamellé collé	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
LVL	EN 14374, EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

(à suivre)

H% moyenne <u>d'équilibre</u> des bois	Classe de Service
$\leq 13\%$ (chauffé)	1
$13\% < H \leq 20\%$ (couvert)	2
$> 20\%$	3*
<b>* Ne pas confondre systématiquement avec le risque biologique</b>	



# Format des vérifications du bois

---

Facteur de modification de résistance :

Classes de durées des chargements (annexe nationale)

<b>Permanent</b>	Poids propre Charges de trafic quasi permanentes
<b>Long terme</b>	Equipements fixes Charges de trafic fréquentes
<b>Moyen terme</b>	Charge de neige $H \geq 1000$ m
<b>Court terme</b>	Charges de trafic caractéristiques Charges piétonnes Charge de neige $H < 1000$ m Neige exceptionnelle Charges d'exécution et d'entretien
<b>Instantané</b>	Situations et actions accidentelles Vent

# Format des vérifications du bois

Facteur de modification de résistance :

Exemple pour notre projet :

4.6.2 Classe de durée des chargements et facteur de modification :

Classe de durée de chargement	Chargement	$k_{mod}$	
	NF EN 1995-2/NA Tableau 2.2	NF EN 1995-1-1/NA Tableau 3.1	
Permanent	Poids-propre Retrait, hydrométrie	0.60	
Court terme	Charges de trafic caractéristique Charges piétonnes	0.90	
	Actions thermiques	0.90	

## 7 Justifications aux ELU :

### 7.1 Combinaisons d'action et propriétés de calcul

Valeurs de calcul des résistances du bois :

		action permanente	action court terme	
		$k_{mod}=0.6$	$k_{mod}=0.9$	
Résistance en flexion	$f_{m,g,k}$	13.44	20.16	MPa
Résistance en traction axiale	$f_{t,0,g,k}$	9.36	14.04	MPa
Résistance en traction perpendiculaire	$f_{t,90,g,k}$	0.22	0.32	MPa
Résistance en compression axiale	$f_{c,0,g,k}$	12.72	19.08	MPa
Résistance en compression perpendiculaire	$f_{c,90,g,k}$	1.44	2.16	MPa
Contrainte résistante en cisaillement	$f_{v,g,k}$	1.54	2.30	MPa

Si une combinaison de chargement consiste en des actions appartenant à différentes classes de durée de chargement, il convient d'utiliser pour  $k_{mod}$  une valeur qui correspond à l'action ayant la plus courte durée d'application, par exemple pour une combinaison de poids propre et de court terme, il convient d'utiliser pour  $k_{mod}$  une valeur correspondant à la charge à court terme. On retient alors la valeur de calcul de la colonne « action court terme ».

# Format des vérifications du bois

Facteur de modification de résistance :

Exemple pour notre projet :

On distinguera pour le projet 2 durées de chargement, et donc 2 combinaisons d'actions à vérifier :

Nota : On considèrera que le gradient thermique comme un chargement permanent d'accompagnement.

**Combinaison d'action permanente :**

Comb 1 :  $1.35 \cdot G_k + 1.50 \cdot (0.6 \cdot T_k)$  avec  $k_{mod} = 0.60$

**Combinaison d'action de court terme :**

Comb 2 :  $1.35 \cdot G_k + 1.35 \cdot (UDL_k + TS_k) + 1.50 \cdot (0.6 \cdot T_k)$  avec  $k_{mod} = 0.90$

A ne surtout pas faire :

$$[1.35 \cdot G_k] \cdot (k_{mod} = 0.60) + [1.35 \cdot (UDL_k + TS_k)] \cdot (k_{mod} = 0.90) \leq \frac{R_k}{\gamma_M} \cdot k_{geo}$$

# Format des vérifications du bois

➡ Valeurs *caractéristiques* des résistances (normes européennes)

Par classe (BM EN 338, LC EN 1194...)		
Flexion	$f_{m,k}$	} <b>Contraintes caractéristiques en <math>N/mm^2</math></b>
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	
Traction perpendiculaire	$f_{t,90,k}$	
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	
Compression perpendiculaire	$f_{c,90,k}$	
Cisaillement	$f_{v,k}$	} <b>Propriétés de rigidité en <math>kN/mm^2</math></b>
Module axial moyen	$E_{mean}$	
Module axial 5%	$E_{0,05}$	
Module moyen transversal	$E_{90, mean}$	
Module de cisaillement moyen	$G_{mean}$	
Module de cisaillement 5%	$G_{0,05}$	} <b>Masse volumique en <math>kg/m^3</math></b>
Masse volumique 5%	$\rho_{0,05}$	
Masse volumique moyenne	$\rho_{mean}$	

# Format des vérifications du bois

Facteur partiels pour les matériaux

EN1995-2 Tab 2.1 - voir EN1993-2			
			$\gamma_M$
<b>combinaison fondamentale</b>			
BLC	vérif générales	1.25	
	vérif fatigue	1	
Assemblages	vérif générales	1.3	
	vérif fatigue	1	
Acier		1.15	voir EN1993-2
Béton		1.5	
Connecteurs	vérif générales	1.25	
	vérif fatigue	1	
<b>combinaison accidentelle</b>			
BLC		1	

Facteur géométrique

"*Kgéo*" coefficient :

- de hauteur (BM, BLC)
- de hauteur/longueur (LVL)

# Format des vérifications du bois

---

Calcul aux États Limites de Service :

## VALEURS LIMITES POUR LES FLECHES

Type d'action	Valeurs de flèches limites
Charges caractéristiques de trafic	L/400
Charges piétonnières et faibles charges de trafic	L/200

# Format des vérifications du bois

---

Prise en compte du fluage des matériaux et des assemblages :

A l'ELS :

Les valeurs moyennes finales des propriétés de rigidité sont déterminées selon les formules suivantes (EN1995-1-1 2.3.2.2 (1)°) :

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + k_{def})}, G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + k_{def})}, K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1 + k_{def})}$$

A l'ELU :

La valeur finale moyenne des propriétés de rigidité est déterminée à partir de :

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + \Psi_2 \cdot k_{def})}, G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + \Psi_2 \cdot k_{def})}, K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1 + \Psi_2 \cdot k_{def})}$$

Le coefficient  $K_{def}$  permet de moduler la déformation de la structure en fonction de la classe de service

# Format des vérifications du bois

Prise en compte du fluage des matériaux et des assemblages :

Exemple :

Classe de durée de chargement	Chargement	$\Psi_2$
	NF EN 1995-2/NA Tableau 2.2	NF EN 1990/A1/NA Tableau A2.1
Permanent	Poids-propre Retrait, hydrométrie	1.00
Court terme	Charges de trafic caractéristique Charges piétonnes	0
	Actions thermiques	0.50

Tableau 3.2 — Valeurs de  $k_{def}$  pour le bois, les matériaux à base de bois

Matériau	Norme	Classe de service		
		1	2	3
Bois massif	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Bois lamellé collé	EN 14080	0,60	0,80	2,00
LVL	EN 14374, EN 14279	0,60	0,80	2,00

# Format des vérifications du bois

## Prise en compte du fluage des matériaux et des assemblages :

Exemple pour un assemblage :

On considère, pour une poutre, un assemblage bois / béton constitué d'une plaque métallique avec deux files de goujons 16 mm espacées de 25 cm coté béton et 4 files de tire-fond de 10 mm espacées de 125 mm coté bois.

Glissement des assemblages			
EN1995-1.1 Tab 7.1			
Diamètre des tire-fonds	d	10	mm
Coefficient multiplicateur bois / béton		1	
Module de glissement pour un tire-fond	$K_{ser}$	3610	N/mm
Nombre de files d'organe		4	
Module de glissement pour une rangée de tire-fond			
- Initiale ELS	$K_{ser}$ (ELS)	14438	N/mm
- Initiale ELU	$K_u$ (ELU)	9625	N/mm
- Finale ELS	$K_{ser,fin}$ (ELS)	8021	N/mm
- Finale ELU <u>comb</u> court terme	$K_{u,fin}$ (ELU CT)	9625	N/mm
- Finale ELU <u>comb</u> long terme	$K_{u,fin}$ (ELU LT)	5347	N/mm

Exemple pour une poutre assemblée :

s1	0.125	m							béton		bois		
	état	<u>comb</u> <u>d'actions</u>	<u>Ebois</u> <u>(MPa)</u>	<u>Ebéton</u> <u>(MPa)</u>	<u>K</u> <u>(MN/m)</u>	<u>nK/s</u> <u>(MN.m/m)</u>	<u>Eleff</u> <u>(MN.m<sup>2</sup>)</u>	<u>leff</u> <u>(m4)</u>	<u>si</u>	<u>s<sub>mi</sub></u>	<u>si</u>	<u>s<sub>mi</sub></u>	<u>t2max</u>
ELS	Initial	<u>court terme</u>	12600	34000	14.44	115.50	865.8	0.069	3.885	4.320	2.938	7.277	3.585
ELU	Final	<u>court terme</u>	10080	34000	9.63	77.00	673.6	0.067	3.737	5.552	2.826	7.482	3.551
	Final	<u>long terme</u>	5600	11333	5.35	42.78	351.4	0.063	3.682	3.548	2.785	7.968	3.628

# *Principaux critères de dimensionnement*



# Principaux critères de dimensionnement

---

## Principales vérifications :

- Flexion des poutres à mi-travée ;
- Cisaillement sous efforts tranchants des poutres sur appui ;
- Cisaillement sous torsion des poutres à mi-travée ;
- Compression transversale sur appui.

## Sous quelle combinaison faire les vérifications :

### • ***A l'état initial (mise en service) :***

- **Comb LT :  $1.35 \cdot G_k + 1.50 \cdot (0.6 \cdot T_k)$  avec  $k_{mod}=0.60$  (pas nécessaire : pas d'effet d'endommagement)**
- Comb CT :  $1.35 \cdot G_k + 1.35 \cdot (UDL_k + TSk) + 1.50 \cdot (0.6 \cdot T_k)$  avec  $k_{mod}=0.90$

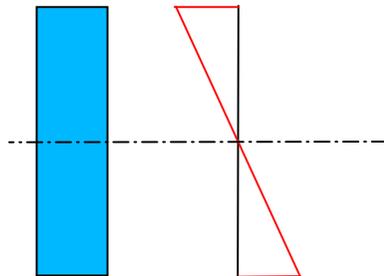
### • ***A l'état final (à 100 ans) :***

- Comb LT :  $1.35 \cdot G_k + 1.50 \cdot (0.6 \cdot T_k)$  avec  $k_{mod}=0.60$
- Comb CT :  $1.35 \cdot G_k + 1.35 \cdot (UDL_k + TSk) + 1.50 \cdot (0.6 \cdot T_k)$  avec  $k_{mod}=0.90$

# Principaux critères de dimensionnement

Flexion des poutres à mi-travée :

Distinguer les cas de flexion simple :

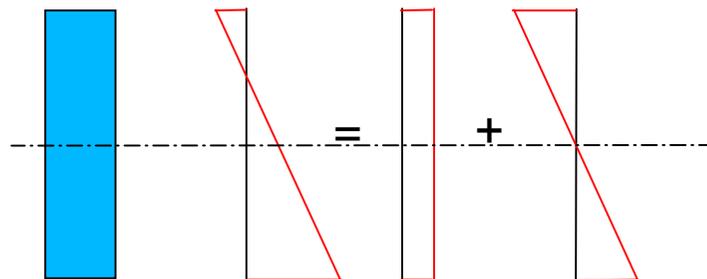


(1)P Les équations suivantes doivent être satisfaites :

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Et les cas de flexion déviée, décomposer la part de traction/compression et de flexion :



## 6.2.3 Flexion et traction axiale combinées

(1)P Les équations suivantes doivent être satisfaites :

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

## 6.2.4 Flexion et compression axiale combinées

(1)P Les équations suivantes doivent être satisfaites :

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Le défaut local est moins préjudiciable en compression qu'en traction ou flexion.

(2) Il convient de prendre pour le facteur  $k_m$  la valeur suivante :

Pour le bois massif, le bois lamellé collé et le LVL :

— pour les sections rectangulaires :  $k_m = 0,7$

— pour les autres sections :  $k_m = 1,0$



# Principaux critères de dimensionnement

---

## Cisaillement sous efforts tranchants des poutres sur appui

### 7.2.3 Cisaillement

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad \text{EN1995-1-1 6.1.7 (1)}$$

$\tau_d$  : valeur de calcul de la contrainte de cisaillement

## Cisaillement sous torsion des poutres à mi-travée

### 7.2.4 Torsion

$$\tau_{tor,d} \leq k_{shape} f_{v,d} \quad \text{EN1995-1-1 6.1.8 (1)}$$

$\tau_{tor,d}$  : valeur de calcul de la contrainte de torsion

$k_{shape}$  : facteur dépendant de la géométrie de la section

$$\text{avec } k_{shape} = \min \begin{cases} 1 + 0,15 \frac{h}{b} \\ 2,0 \end{cases}$$

# Principaux critères de dimensionnement

---

## Compression transversale sur appui

Le bois travaille mal en compression transversale ce qui limite l'intensité des efforts que l'on peut transmettre :

$$f_{c,90,g,k}(GL28) = 3,0 \text{ MPa}$$

Les limites admissibles sous charges permanentes et en service sont ainsi très faibles :

$$f_{c,90}(CP) = 3,0 * 0.6 / 1.25 = 1.44 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90}(CP + S) = 3,0 * 0.9 / 1.25 = 2.16 \text{ MPa}$$

En comparaison, les élastomères frettés acceptent des contraintes plus importantes (cf Guide SETRA : Appareils d'appuis en élastomères frettés) :

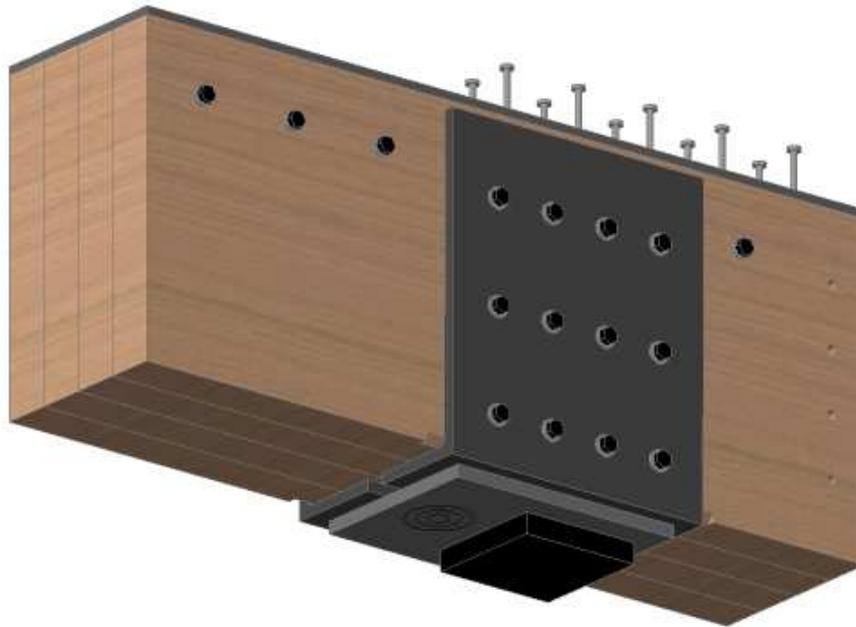
$$f_c(CP) = 3.00 \text{ MPa}$$

$$f_c(CP + S) = \text{entre 20 et 25 MPa}$$

Il semble nécessaire de renforcer localement les poutres en bois par des frettages chargés de reprendre à eux seuls la réaction d'appuis et de la répartir sur la hauteur de la poutre.

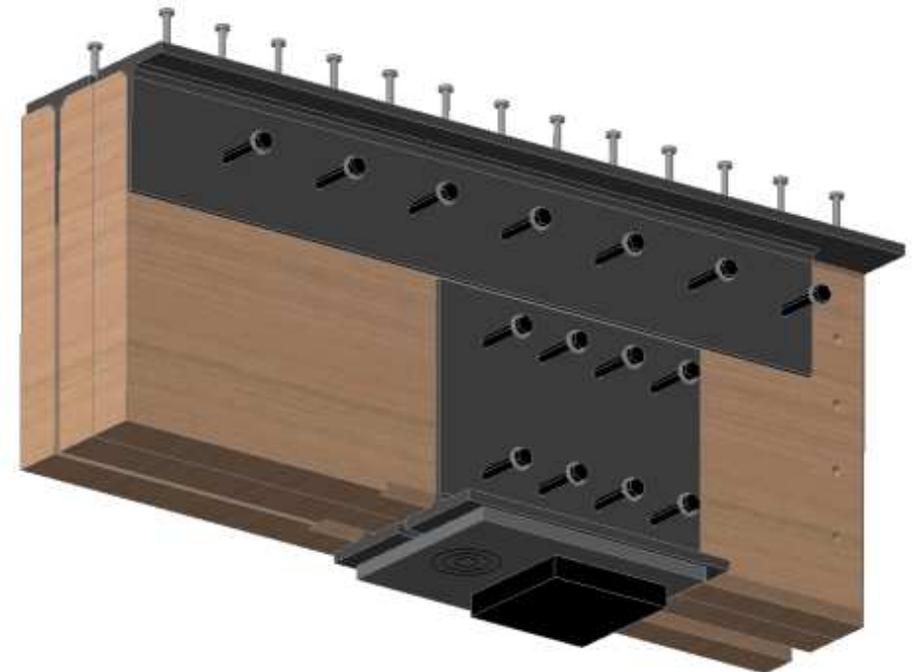
# Principaux critères de dimensionnement

## Compression transversale sur appui



La solution consiste à transmettre au bois la réaction d'appui par l'intermédiaire de plaques métalliques.

La transmission de l'effort se fait conjointement par frottement bois/métal et par les organes d'assemblages.

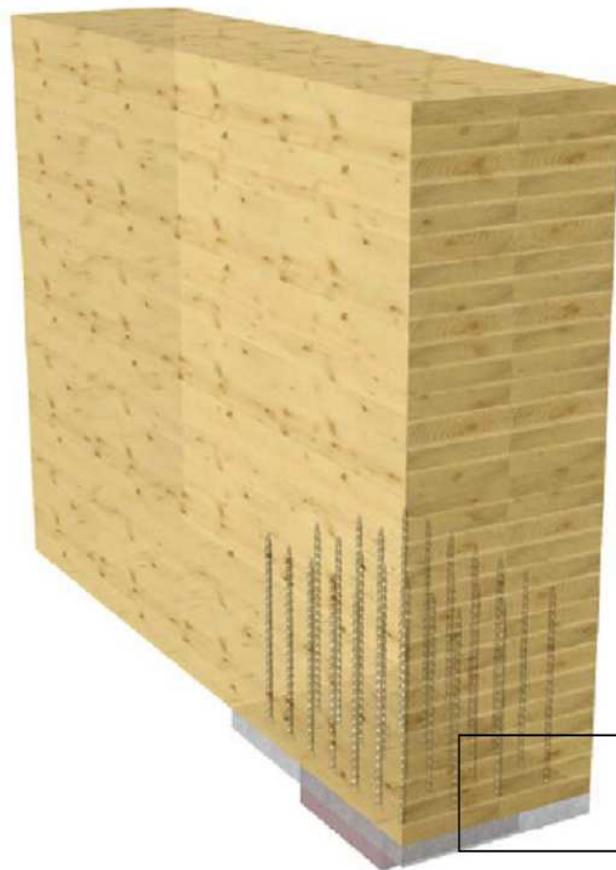


Solution toujours limitée par la compression transversale qui ne permettra pas de modéliser du frottement bois/métal.

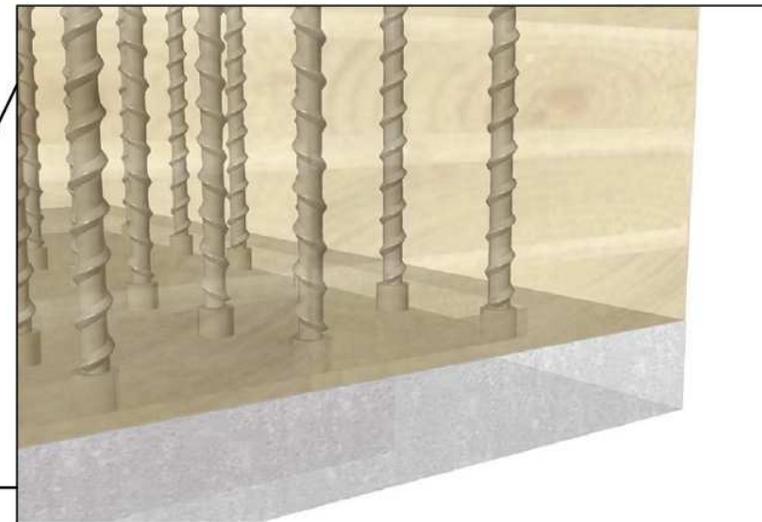
# Principaux critères de dimensionnement

---

Compression transversale sur appui : **frettage**



La solution consiste à renforcer la poutre bois à l'aide d'un frettage type WB de SFS qui transmettra les efforts sur la hauteur de la poutre et assurera la pérennité de la poutre sur appui.



**Merci de votre attention...**