

Événement / AFGC

## Webinaire « les jeudis de l'AFGC » : les ponts intégraux

CONCEPTIONS SEMI-INTEGRALE  
ET INTEGRALE EN OUVRAGES D'ART

Fabien RENAUDIN  
Cerema Centre-Est

Jeudi 12 décembre 2024

# SOMMAIRE

- ❑ Définitions
- ❑ Contexte
- ❑ Conception semi-intégrale
- ❑ Conception intégrale
- ❑ Evolutions de l'Eurocode
- ❑ Bibliographie



## DÉFINITIONS

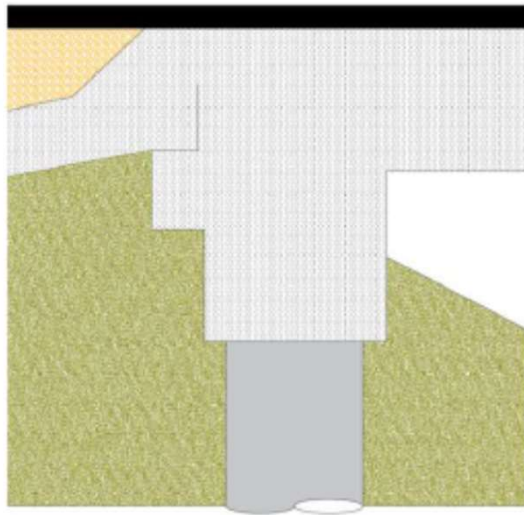


# DEFINITION

## ➤ PONT INTEGRAL

Pont dont les extrémités ne présentent **ni joints de chaussée ni appareils d'appui**.

La structure du tablier est liée à la culée de manière monolithique. Pour ce type de pont, la structure du tablier est le plus souvent liée de façon monolithique aux appuis intermédiaires lorsqu'ils existent

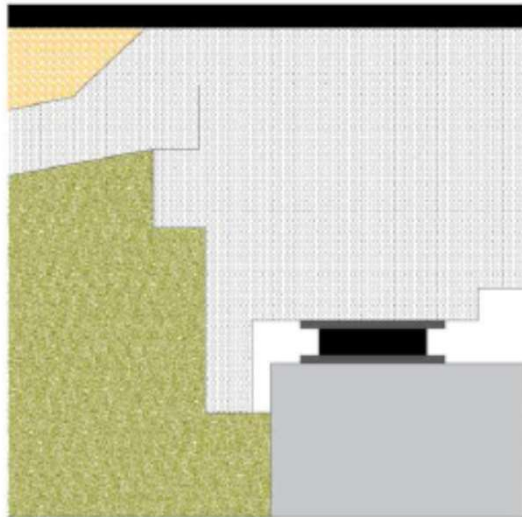


# DEFINITION

## ➤ PONT SEMI-INTEGRAL

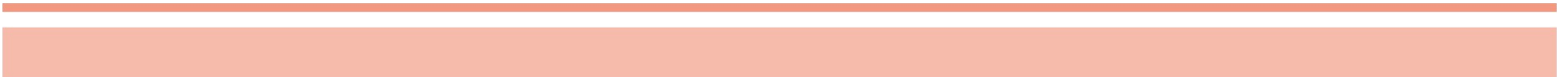
Pont dont les extrémités ne présentent **pas de joints de chaussée**.

Pour ce type de pont, la structure du tablier repose le plus souvent sur les appuis intermédiaires lorsqu'ils existent par l'intermédiaire d'appareil d'appui





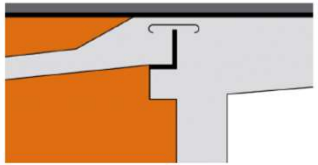
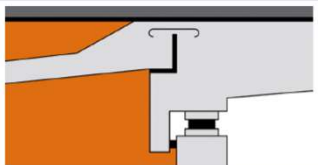
## CONTEXTE



## CONTEXTE – ETAT DE L'ART EN FRANCE

➤ Le recours à des **conceptions intégrales et semi-intégrales** en ouvrage neuf ou en adaptation d'ouvrages existants demeure encore très limité en France.

- ✓ Ponts cadres, portiques simples ou doubles : ponts intégraux largement répandus sur le territoire depuis les années 1960
- ✓ Dossier pilote PP73 (Piles et Palées de 1973) : aborde la conception semi-intégrale,
- ✓ Guide Cerema « Appuis en béton des ouvrages d'art. Tome 1 » 2023 : donne des exemples de réalisation

Vocabulaire	Définition	Schéma
Culée ou extrémité de pont intégrale	Appui d'extrémité sans joint de chaussée ni appareil d'appui, et comportant une dalle de transition liaisonnée au tablier (articulation de type section rétrécie de béton)	
Culée ou extrémité de pont semi-intégrale	Appui d'extrémité sans joint de chaussée mais avec appareil d'appui, et comportant une dalle de transition liaisonnée au tablier (articulation de type section rétrécie de béton)	

➤ **Mais** absence d'une doctrine suffisamment structurée favorisant le développement de ces conceptions.

➤ **Pourtant** ces conceptions offrent de nombreux avantages en termes d'entretien en réduisant ou supprimant notamment le besoin en maintenance des joints de dilatation, des appareils d'appui et des abouts d'ouvrage.

## CONTEXTE – CONSTATS SUR ABOUTS DE TABLIER

- **Maintenance des joints de chaussées** plusieurs fois au cours du cycle de vie de l'ouvrage :
  - ✓ Chantiers relativement coûteux sur le long terme et particulièrement impactant vis-à-vis de l'exploitation des itinéraires à fort trafic
  - ✓ Conditions de réalisations imposées qui nuisent grandement à la durabilité de ces travaux de réparation (travail de nuit, délais d'intervention très courts, phasage par demi-chaussée...)
  
- **Défaillance souvent constatée de l'étanchéité** des joints de chaussée pouvant entraîner de graves désordres sur les structures sous-jacentes :
  - ✓ Corrosion des appareils d'appui métalliques avec altération de leur fonctionnement,
  - ✓ Corrosion des structures métalliques du tablier avec cas constatés de corrosion ultime d'âme de poutres,
  - ✓ Corrosion des armatures de béton armé des tabliers et des appuis en béton,
  - ✓ Ruissellements d'eau chargée en chlorures à proximité des ancrages en about des dalles précontraintes,....





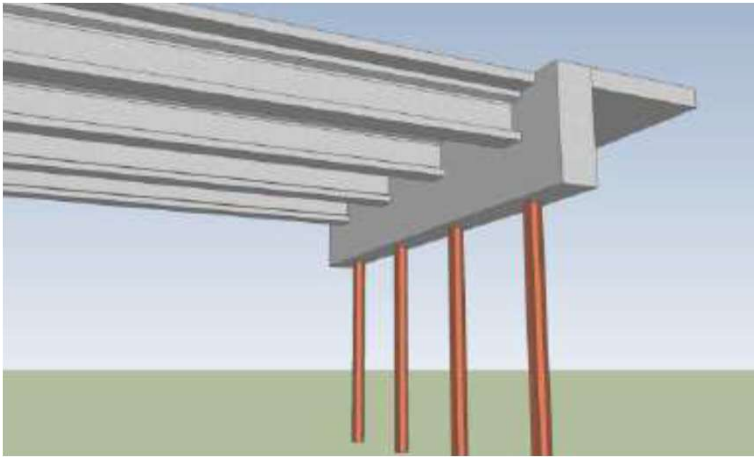
## CONTEXTE – INTERET DES SOLUTIONS « INTEGRALES »

- **Pertinence** pour de nouvelles constructions ou à la faveur d'une réparation, **d'envisager la suppression des joints de chaussée** en optant pour une conception intégrale ou semi-intégrale.
  
- **Surcoût lié** à ces conceptions est **pratiquement négligeable** pour une conception neuve

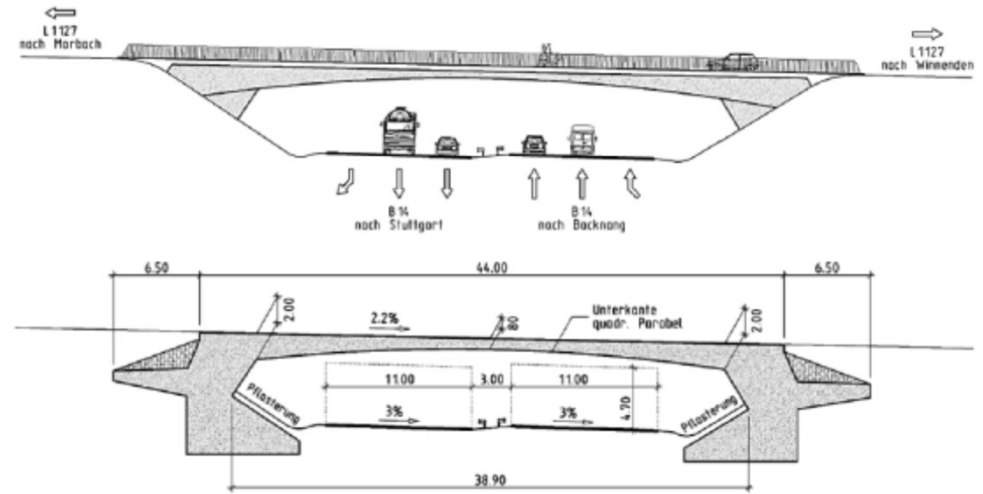


# CONTEXTE – LES PRATIQUES À L'ETRANGER

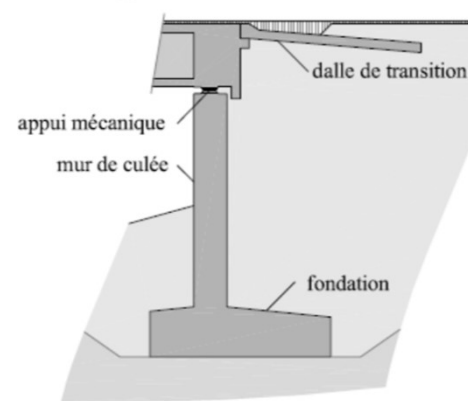
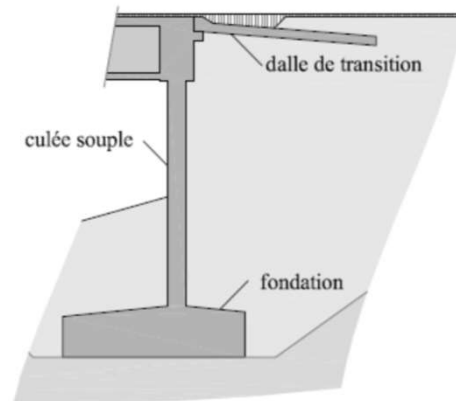
- Culées souples (anglo-saxons – USA)



- Culées rigides (Germany)

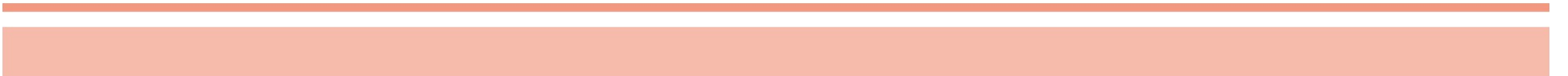


- Pratiques suisses avec dalles de transition intégrées





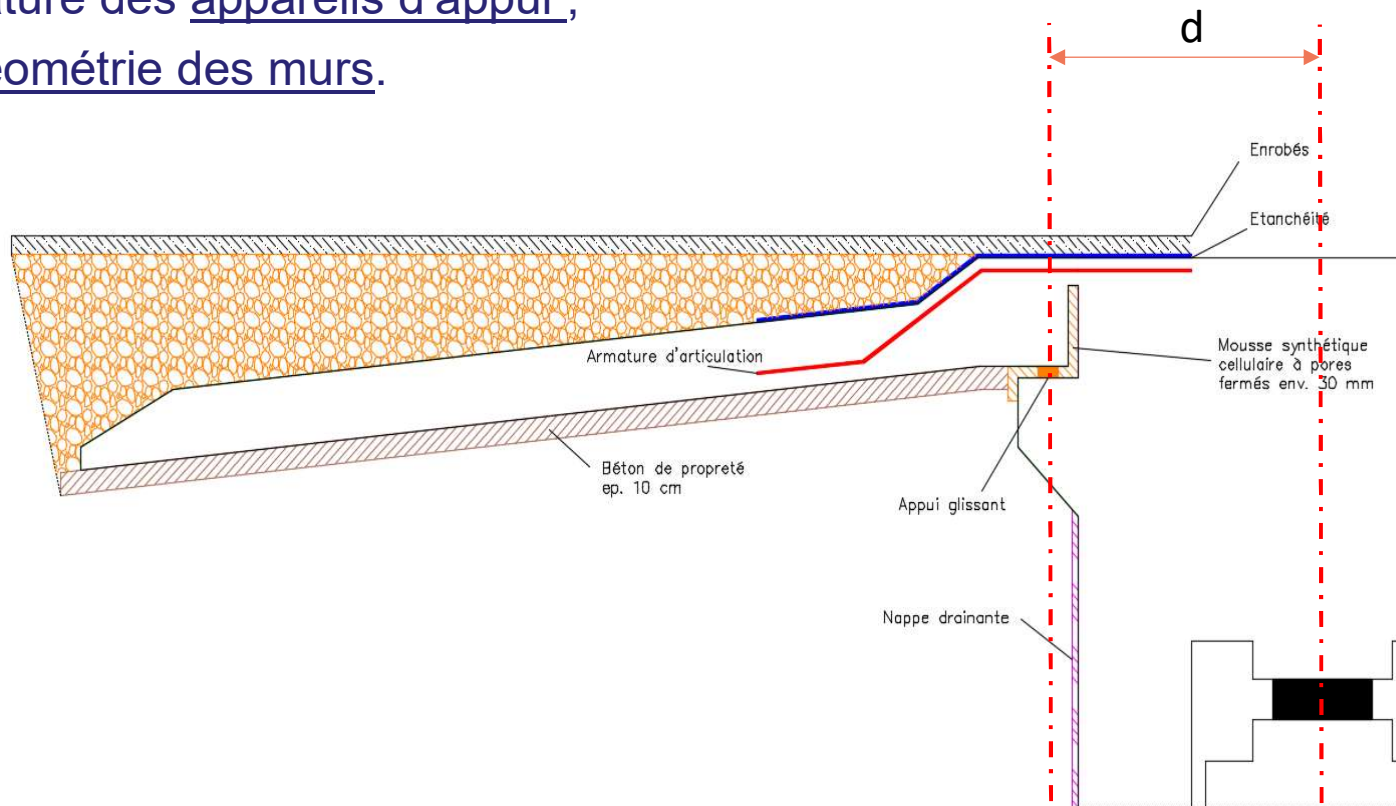
**CONCEPTION SEMI-INTEGRALE**



# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ CONCEPTION SEMI-INTEGRALE CARACTERISEE PAR :

- ✓ La géométrie de la dalle de transition ;
- ✓ Le principe de retombée de dalle assurant la reprise de la poussée des terres ;
- ✓ La nature des appareils d'appui ;
- ✓ La géométrie des murs.

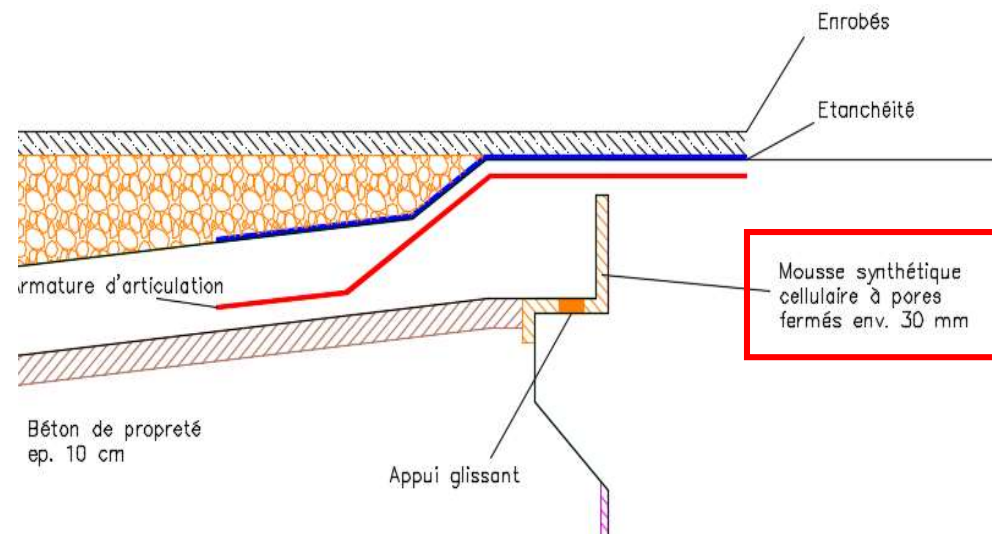


# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ DALLE DE TRANSITION

- ✓ Généralement requise pour les ouvrages routiers fortement circulés
- ✓ La dalle de transition est articulée sur l'extrémité du tablier dans le but de permettre une rotation relative entre le tablier et la dalle de transition.

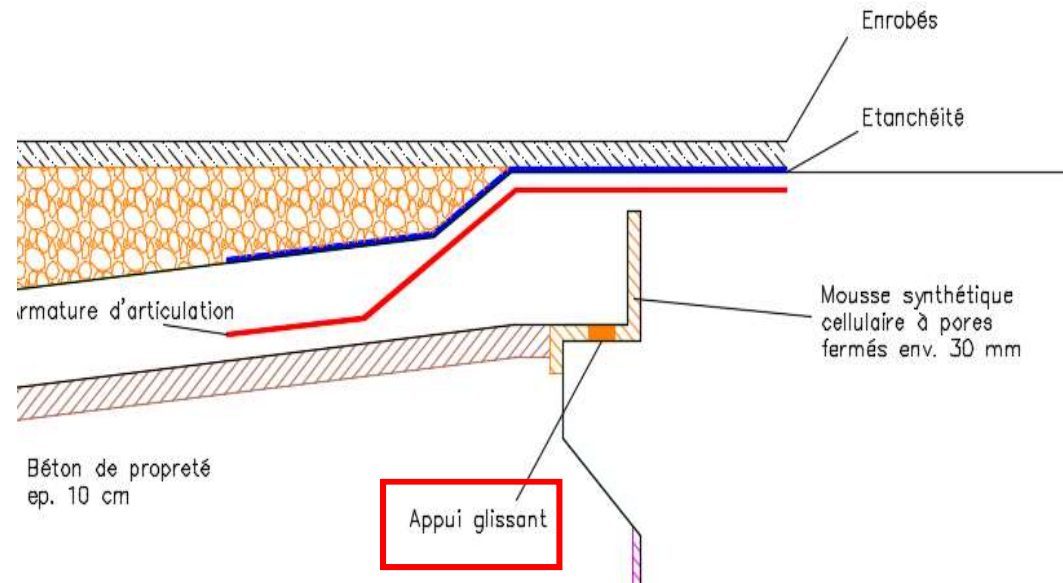
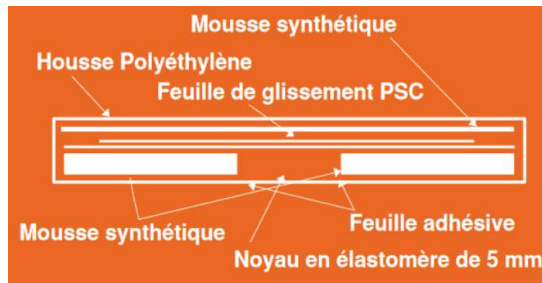
Les joints horizontaux et verticaux ménagés entre la dalle de transition et le tablier ont une épaisseur de 3 à 5 cm et sont constitués de polystyrène expansé ou de mousse expansée.



# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ DALLE DE TRANSITION

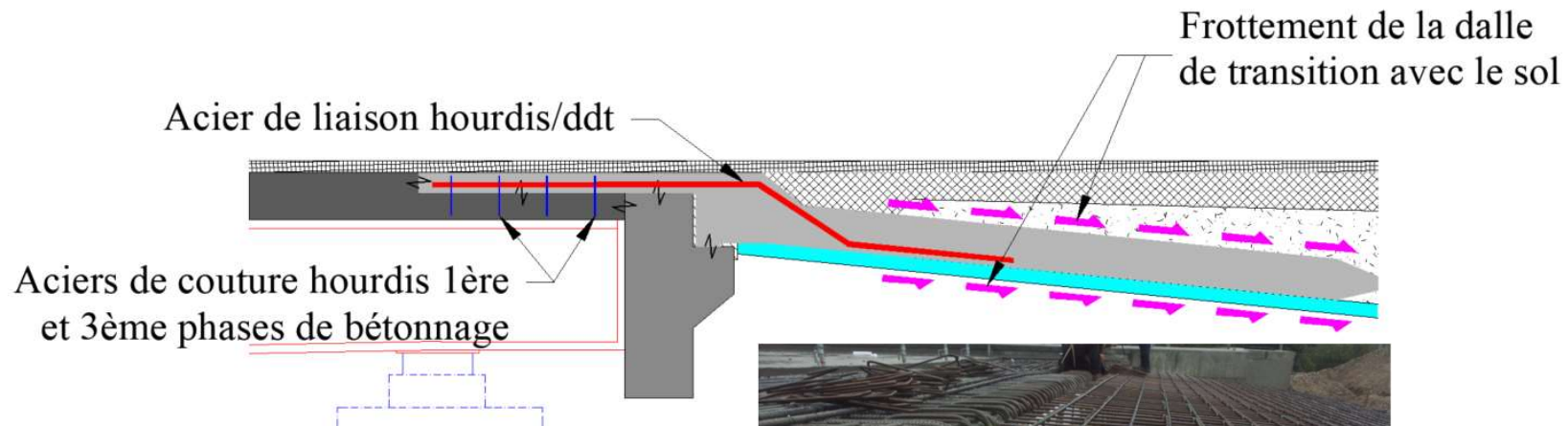
- ✓ Afin de permettre le déplacement engendré par la rotation du tablier et d'assurer l'appui de la dalle de transition sur le corbeau des appuis linéaires à glissement sont utilisés



# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ DALLE DE TRANSITION

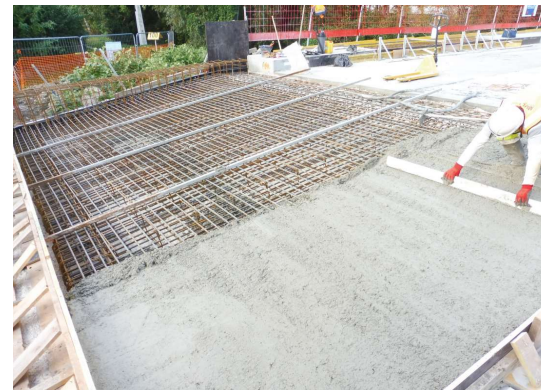
- ✓ La liaison en béton armé de la dalle de transition au tablier ne comporte qu'un seul lit d'acier disposé en partie supérieure de la dalle.
- ✓ La continuité mécanique des aciers peut le cas échéant être assurée par coupleurs ou des boîtes d'attente.
- ✓ Pour le reste, le ferrailage de la dalle de transition est classique.



# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ DALLE DE TRANSITION

- ✓ Le ferrailage et le bétonnage de la dalle sont classiques
- ✓ L'étanchéité du tablier est prolongée sur la dalle de transition (ou sur la retombée de dalle en l'absence de dalle de transition) sur au moins 1 m

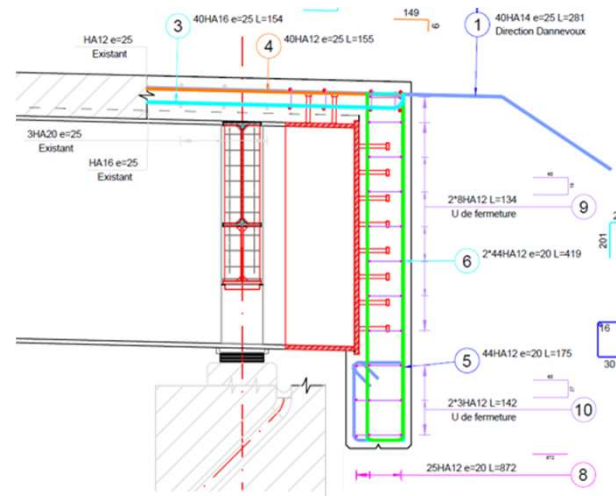




# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ RETOMBEE DE DALLE

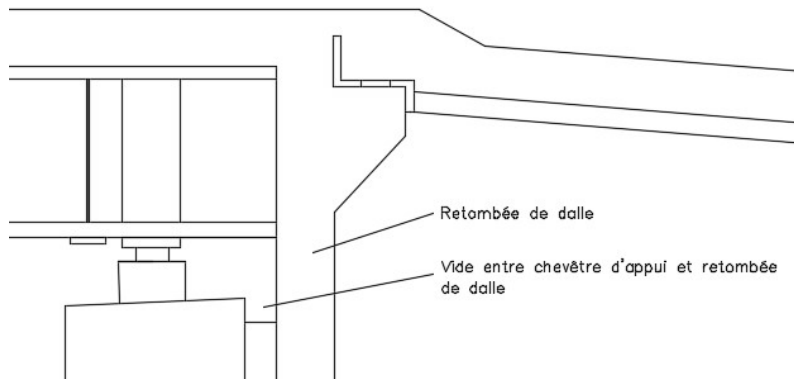
- ✓ Elle est liaisonnée mécaniquement à la structure porteuse du tablier (poutres, dalle...).
- ✓ La retombée de dalle peut être partiellement préfabriquée



# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ RETOMBEE DE DALLE

- ✓ Le vide entre la retombée de dalle et le sommier d'appui est de l'ordre de 20 cm



# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ APPAREILS D'APPUI

- ✓ Les appareils d'appui mis en œuvre sont très généralement du type « élastomère fretté ».
- ✓ Pour leur remplacement ultérieur : transfert la descente de charge du tablier sur appuis provisoires sans déplacement, démolition des bossages

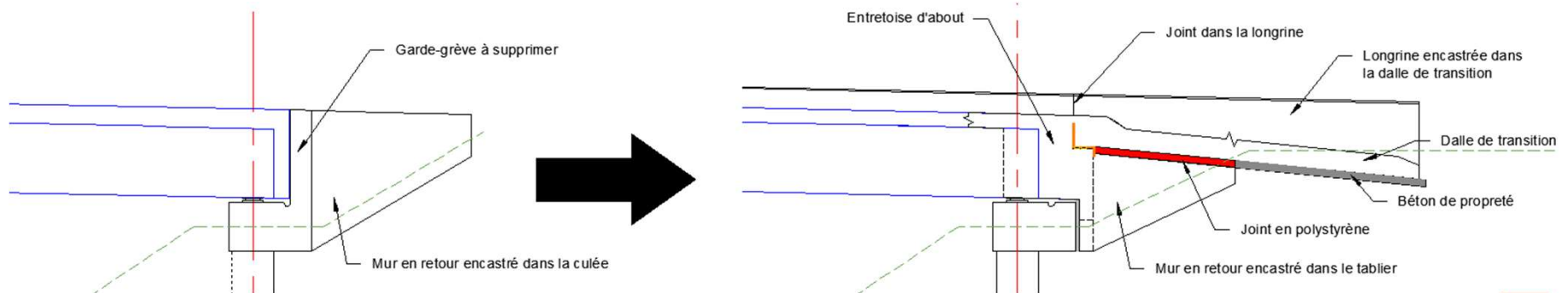
*Il est toutefois permis de penser que le changement des appareils d'appui ne sera pas nécessaire compte tenu de la conception adoptée*



# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ MURS ASSOCIES

- ✓ Dans le cas général, les murs d'extrémités sont portés par les appuis.
- ✓ Il est possible de les encastrer dans le tablier si les murs restent de dimensions modestes. Ils viennent alors s'enfoncer dans le remblai.

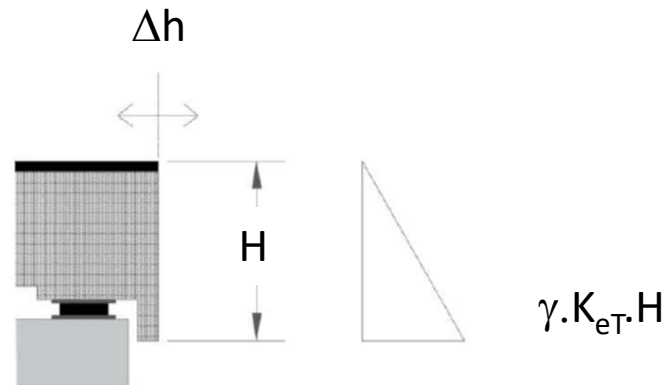


# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ JUSTIFICATION DE LA CONCEPTION

- ✓ La conception semi-intégrale ne modifie pratiquement pas les sollicitations dans le tablier. Les effets de la poussée accrue des terres contre le tablier sont en effet généralement très limités compte tenu de la faible hauteur de la retombée de dalle.

Directive suisse  
OFROU



$$K_{eT} = K_0 + \left( 40 \cdot \frac{\Delta h}{H} \right)^{0.4} \cdot K_p \leq K_p$$

Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,  
de l'énergie et de la communication DETEC  
Office fédéral des routes OFROU

Directive Edition 2011 V1.00

**Détails de construction de ponts**

- Chapitre 0 Introduction
- Chapitre 1 Appareils d'appui
- Chapitre 2 Joints de chaussée
  - Calcul des mouvements aux appareils d'appui et aux joints de chaussée. Exemple
- Chapitre 3 Extrémités de ponts**
- Chapitre 4 Bordure de pont et terre-plein central
- Chapitre 5 Etanchéités et revêtements
- Chapitre 6 Evacuation des eaux
- Chapitre 7 Conduites industrielles

ASTRA 12 004 ASTRA OFROU USTRA UVIAS

# GAMME D'UTILISATION DE CONCEPTION INTEGRALE

## ➤ DEPLACEMENT MAXIMAL EN EXTREMITE DE TABLIER

- ✓ Une telle conception est envisageable pour des tabliers dont **le déplacement maximal est de l'ordre de 20 mm** dans le cas général (depuis une position de référence). Ceci correspond à des **longueurs dilatables** (distance entre l'extrémité et le point fixe) qui restent modérées mais peuvent néanmoins atteindre couramment **30 m**.

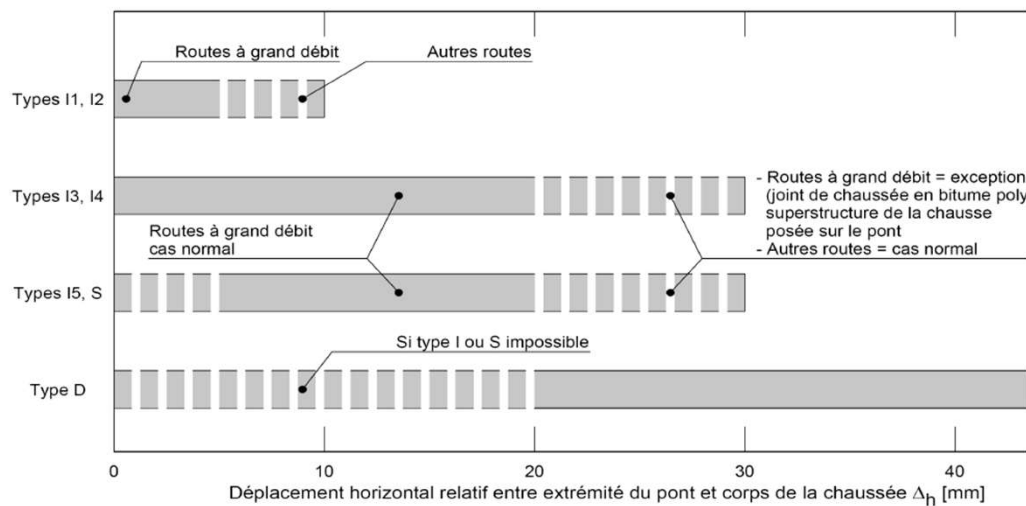
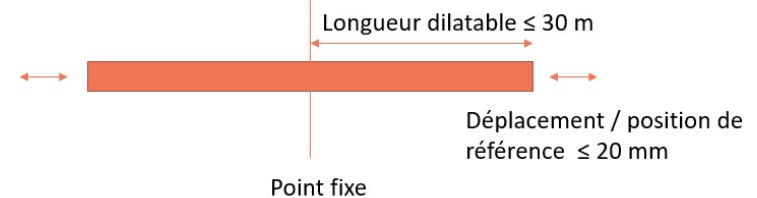


Fig. 4.8 Champs d'application des types d'exécution de l'extrémité du pont (valeurs indicatives du déplacement relatif admissible  $\Delta_{h,adm}$  à l'extrémité du pont).

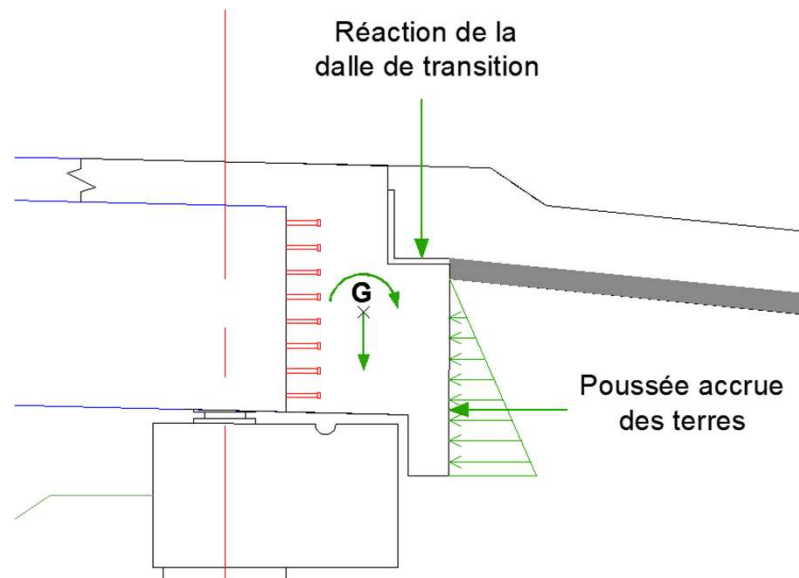


Dispositions particulières pour les ouvrages biais

# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ JUSTIFICATION DE LA CONCEPTION

- ✓ La **résistance de la retombée de dalle** sollicitée par la poussée accrue des terres doit être vérifiée en tenant compte du mode de liaison au tablier; la poussée accrue des terres résultant des dilatations thermiques gênées du tablier :
  - est pondérée dans les combinaisons d'actions comme une action thermique
  - est déterminée en considérant le coefficient de butée du sol (butée) associé à un frottement sur paroi de  $-\varphi/2$  où  $\varphi$  est l'angle de frottement interne du sol



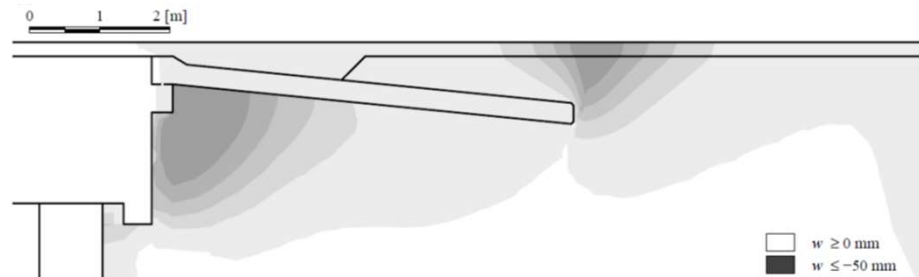




# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ JUSTIFICATION DE LA CONCEPTION

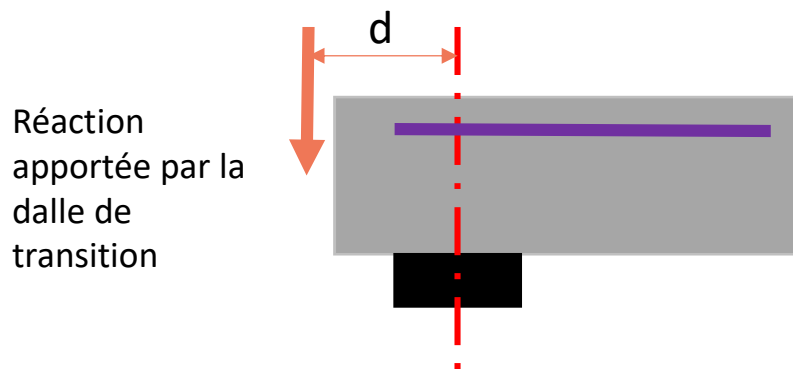
- ✓ Le ferrailage de liaison de la dalle de transition articulée dans le tablier doit être justifié
  - Ce ferrailage dépend notamment du tassement du remblai d'accès et de l'épaisseur des joints permettant le mouvement de la dalle de transition au droit de l'articulation.
  - Il peut être déterminé sur la base de ratios types. Ainsi les essais réalisés lors de la thèse de D. Dreier à L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) « Interaction sol-structure dans le domaine des ponts intégraux » en 2010 ont testés des ratios de respectivement 0,3% et 0,7% d'aciers passifs.
  - Un ratio de 0,3% permet d'atteindre les rotations admissibles de la dalle de transition données ci-avant sans entrainer une fissuration jugée excessive sachant, en outre, que la zone de rotule est protégée par une étanchéité. Le ferrailage doit également permettre la transmission de l'effort d'entraînement de la dalle de transition frottante.



# PRINCIPES DE CONCEPTION SEMI-INTEGRALE

## ➤ ADAPTATION DES OUVRAGES EXISTANTS

- Des **renforcements** sont potentiellement à prévoir **aux extrémités** comme le renforcement de la section transversale du tablier au droit de l'appui du fait du porte-à-faux et de la descente de charge apportée par la dalle de transition articulée





# PRINCIPES DE LA CONCEPTION INTEGRALE



# PRINCIPES DE CONCEPTION INTEGRALE

## ➤ ENCASTREMENT DE LA TRAVERSE

- ✓ Confère à l'ouvrage intégral une robustesse certaine tout en écartant les risques de détérioration (corrosion armatures, des poutres métalliques...)
- ✓ Limite l'entretien (absence de joints de chaussée)

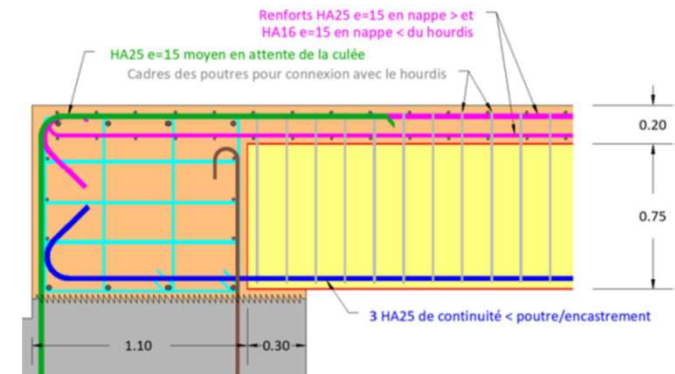
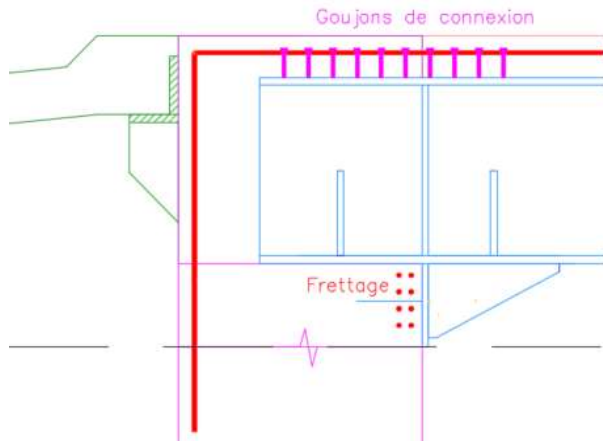


# PRINCIPES DE CONCEPTION INTEGRALE

## ➤ ENCASTREMENT DE LA TRAVERSE

- ✓ Introduit une forte interaction entre le sol et la structure dont la modélisation conserve une certaine part d'incertitudes

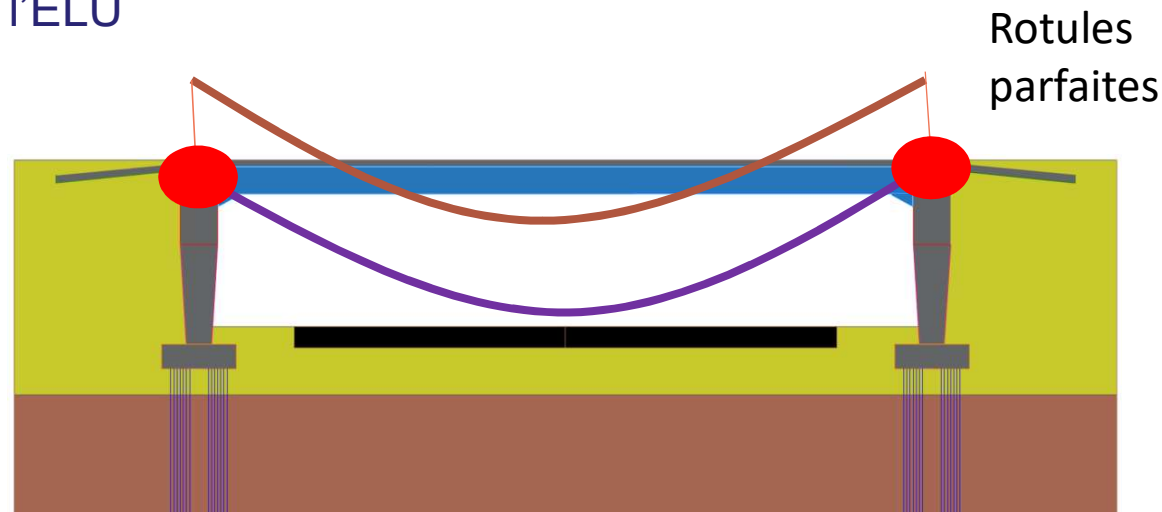
**Les efforts à l'encastrement peuvent se révéler importants conduisant à des ferrillages denses voire à des difficultés de mise en œuvre.**



# PRINCIPES DE CONCEPTION INTEGRALE

## ➤ ENCASTREMENT DE LA TRAVERSE

- ✓ Conseil de réaliser une vérification en fonctionnement isostatique de la traverse à l'ELU



- ⇒ Fissuration excessive du béton dans la zone d'encastrement compensée par une redistribution d'efforts vers les sections en travée
- ⇒ Par exemple pour une structure mixte : le béton du hourdis est comprimé en travée et il est possible de bénéficier de toute la ductilité et de la résistance de la structure mixte la vérification est généralement acquise sans augmentation notable des quantités

# PRINCIPES DE CONCEPTION INTEGRALE

## ➤ HYPOTHESES PARTICULIERES

- ✓ La conception intégrale nécessite une attention particulière concernant la définition des hypothèses relatives :
  - A la **poussée accrue des terres** engendrée par les cycles de déplacements thermiques de la structure
  - Aux **sollicitations thermiques et aux déformations différées** : l'encastrement de la traverse induit des efforts sous sollicitations thermiques (gradient et température uniforme) et sous retrait du béton
  - A la **fissuration du béton** dans les zones d'encastrement où il est tendu.

# PRINCIPES DE CONCEPTION INTEGRALE

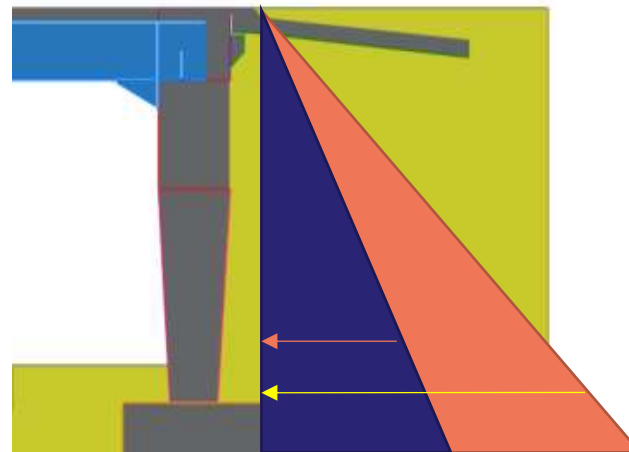
## ➤ POUSSEE ACCRUE DES TERRES

✓ Pratique française (OA type PICF, PIPO ou POD) :

enveloppe entre

- le coefficient de poussée active  $K_a = 0,25$

- le coefficient de poussée au repos  $K_0 = 0,50$



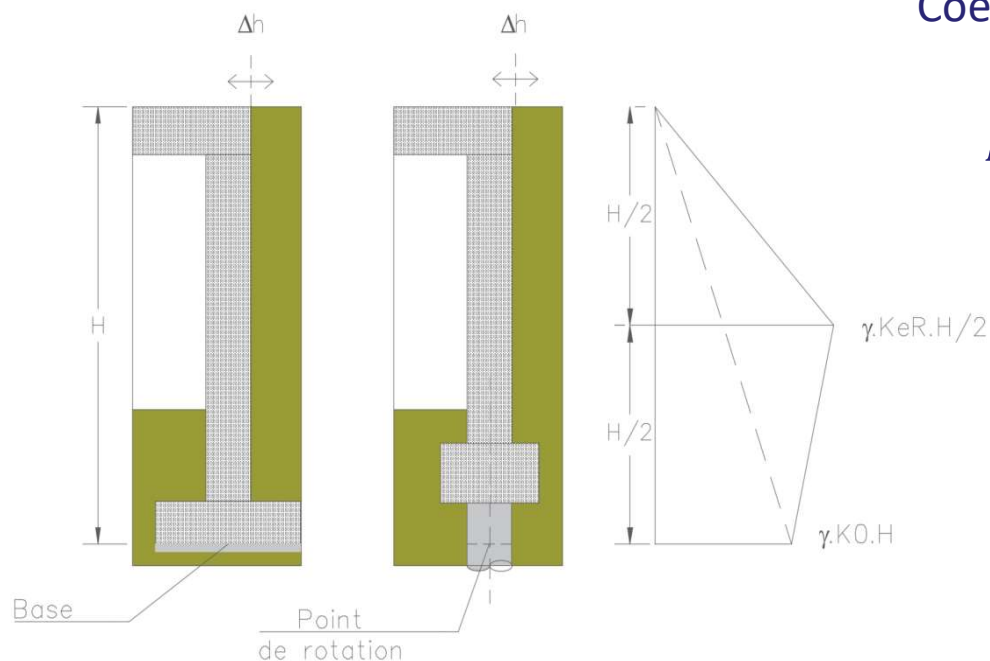
$$K_a \gamma h$$



# PRINCIPES DE CONCEPTION INTEGRALE

## ➤ POUSSEE ACCRUE DES TERRES

- ✓ Pratique suisse : Détermination des efforts dus à la poussée accrue des terres = Détermination du point de rotation de la structure



Coefficient de poussée accrue des terres

$$K_{eR} = K_0 + \left(0,33 \cdot \frac{\Delta h}{H}\right)^{0,6} \cdot K_p \leq K_p$$

Avec :

$K_0$  : coefficient de poussée des terres au repos

$K_p$  : coefficient de poussée passive des terres

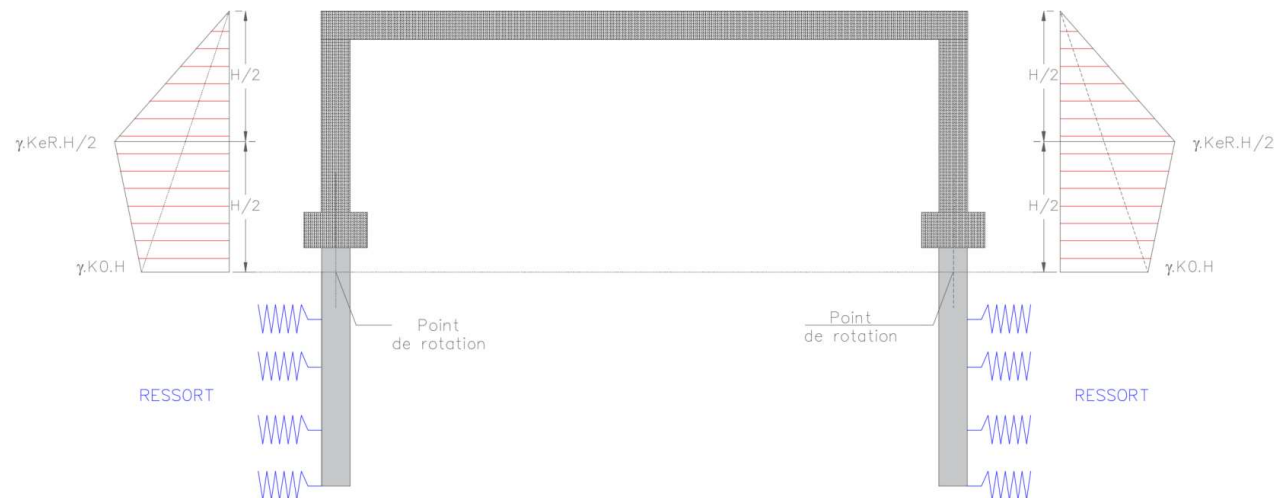
$\Delta h$  : amplitude du déplacement relatif cyclique sous combinaisons fréquentes

$H$  : hauteur de la base du piédroit (semelle superficielle) ou du point de rotation fictif (pieux).

# PRINCIPES DE CONCEPTION INTEGRALE

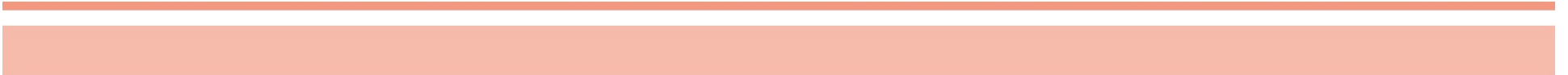
## ➤ POUSSEE ACCRUE DES TERRES

- ✓ Pratique suisse : Détermination des efforts dus à la poussée accrue des terres = Détermination du point de rotation de la structure



- Détermination de la déformée sous enveloppe des combinaison fréquentes
- Les ressorts représentant la réaction du sol sur les piédroits sont uniquement modélisés sous le point de rotation de la fondation.

# > LES ÉVOLUTIONS DE L'EUROCODE



# LES ÉVOLUTIONS DE L'EUROCODE

## ➤ Travaux en cours de mise à jour de l'Eurocode

*EC0 – Annexe A2 – Application pour les ponts*

*Article A-2-7-10 – Règles de combinaison pour les ponts à culée intégrale*

*Limitation du mouvement caractéristique au niveau de la culée intégrale à*

$$D_{int} = \pm 30 \text{ mm}$$

*Il convient d'appliquer à la culée une plage de pressions de sol, en tenant compte de l'augmentation des pressions de sol au fil des cycles répétés de mouvements, ainsi que des sens de mouvement de la culée*

*L'EN 1997-3 fournit des méthodes d'estimation du mouvement nécessaire pour mobiliser une proportion donnée d'une résistance passive.*

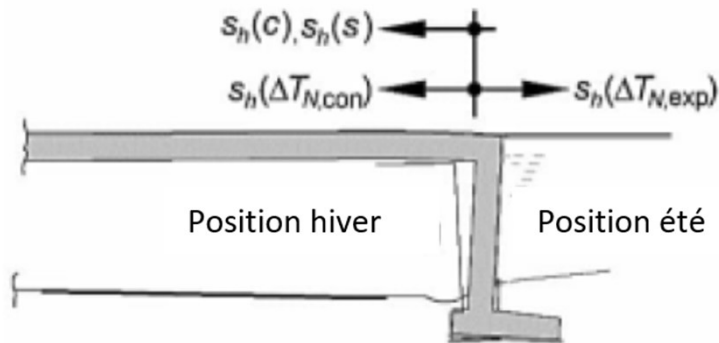
# LES ÉVOLUTIONS DE L'EUROCODE

## ➤ Poussée accrue des terres pour un mur de front

EC7 : en référence aux recommandations allemandes

Richtlinien für den  
Entwurf, die konstruktive Ausbildung  
und Ausstattung von Ingenieurbauten

RE-ING



Avec :

- $s_h$  : déplacement en tête
- $s_h(c)$  : déplacement en tête dû au retrait
- $s_h(s)$  : déplacement en tête dû au fluage
- $s_h(\Delta T_N)$  : déplacement en tête dû aux effets thermiques

Coefficient de poussée accrue des terres

$$K_{ph,mob(z)} = K_0 + (K_{ph} - K_0) \cdot \frac{\frac{v(z)}{z}}{\alpha + \frac{v(z)}{z}}$$

Avec :

$K_0$  : coefficient de poussée des terres au repos

$K_{ph}$  : coefficient de poussée passive des terres

$\alpha$  : coefficient égal à 0,02

$z$  : profondeur depuis la surface

$v(z)$  : déplacement horizontal à la profondeur  $z$

$$v(z) \approx s_h \left( 1 - \frac{z}{h} \right)$$

$h$  : profondeur du point de rotation



**BIBLIOGRAPHIE**



# BIBLIOGRAPHIE

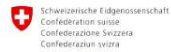
- Guide Cerema « Adaptations des ouvrages existants à de nouveaux usages » - A paraître
- Guide Cerema « Ponts intégraux » - A paraître
- Directive « Détails de construction de ponts – Partie 3 : Extrémité de ponts - OFROU - 2011 V1.10
- Thèse de doctorat de Damien Dreier « Interaction sol-structure dans le domaine des ponts intégraux » - [EPFL n° 4880](#), décembre 2010
- Guide INTAB « Conception économique et durable des ponts mixtes avec culées intégrales – Research Fund for Coal & Steel

## Interaction sol-structure dans le domaine des ponts intégraux

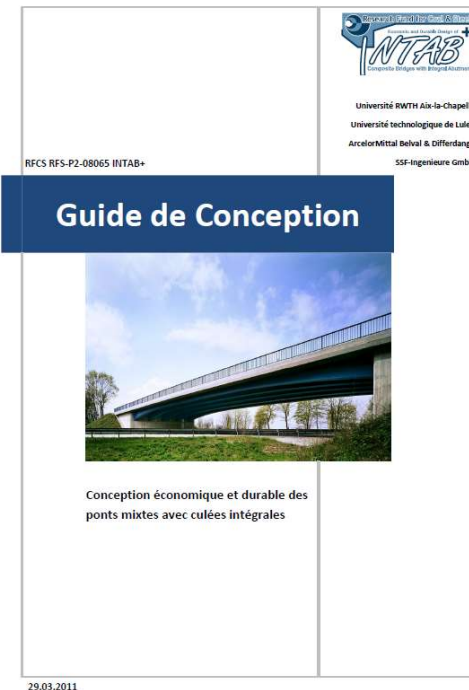
THÈSE N° 4880 (2010)  
 PRÉSENTÉE LE 10 DÉCEMBRE 2010  
 À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT  
 LABORATOIRE DE CONSTRUCTION EN BÉTON  
 PROGRAMME DOCTORAL EN STRUCTURES  
 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE  
 POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR  
 Damien DREIER

acceptée sur proposition du jury:  
 Prof. A.-G. Dumont, président du jury  
 Prof. A. Muttoni, directeur de thèse  
 Dr W. Kaufmann, rapporteur  
 Prof. L. Laloui, rapporteur  
 Prof. M. Pastor Pérez, rapporteur



Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
 Office fédéral des routes OFROU



**Merci de votre attention**

[fabien.renaudin@cerema.fr](mailto:fabien.renaudin@cerema.fr)