



# POUTRE-CAISSON ASYMETRIQUE EN BETON

Comportement différé

Alexandre MICHOU

# Introduction

L'objectif de cette présentation est d'étudier le fonctionnement et le comportement d'une poutre-caisson, et particulièrement le comportement différé des structures à caissons asymétriques.

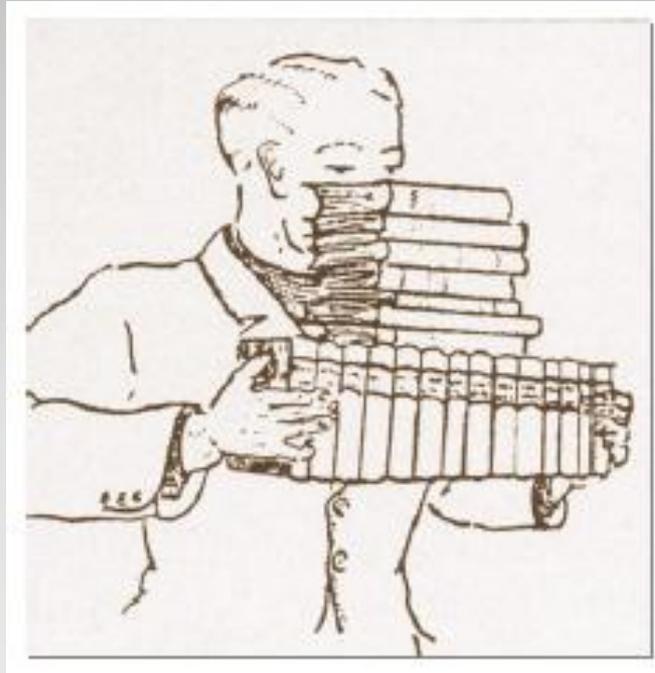
Pour cela, nous commencerons par expliquer la technique de précontrainte de façon théorique. Celle-ci est utilisée dans de nombreux ouvrages en Génie Civil, notamment dans les structures à caissons.

Nous nous intéresserons ensuite aux poutres-caisson de manière générale; puis au cas particulier de caissons asymétriques, sujet aux phénomènes de retrait et de fluage du béton.

Après des données théoriques sur ces deux phénomènes, nous illustrerons le comportement différé de telle structure par l'exemple du Pont de Koror-Babeldaob à Palau. Nous quantifierons les résultats théoriques par un calcul Eléments Finis sur le logiciel Castem.

## Plan :

Béton Précontraint .....	p.3
Poutre-Caisson.....	p.10
Retrait et Fluage du Béton .....	p.16
Poutre-Caisson asymétrique.....	p.22
Effet du Retrait	
Calcul Eléments Finis	

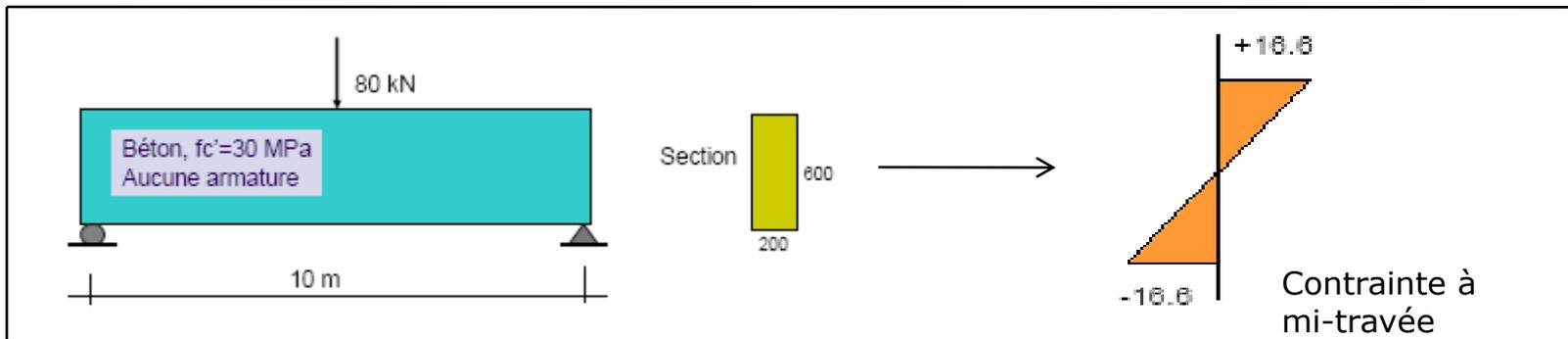


# BETON PRECONTRAINTE

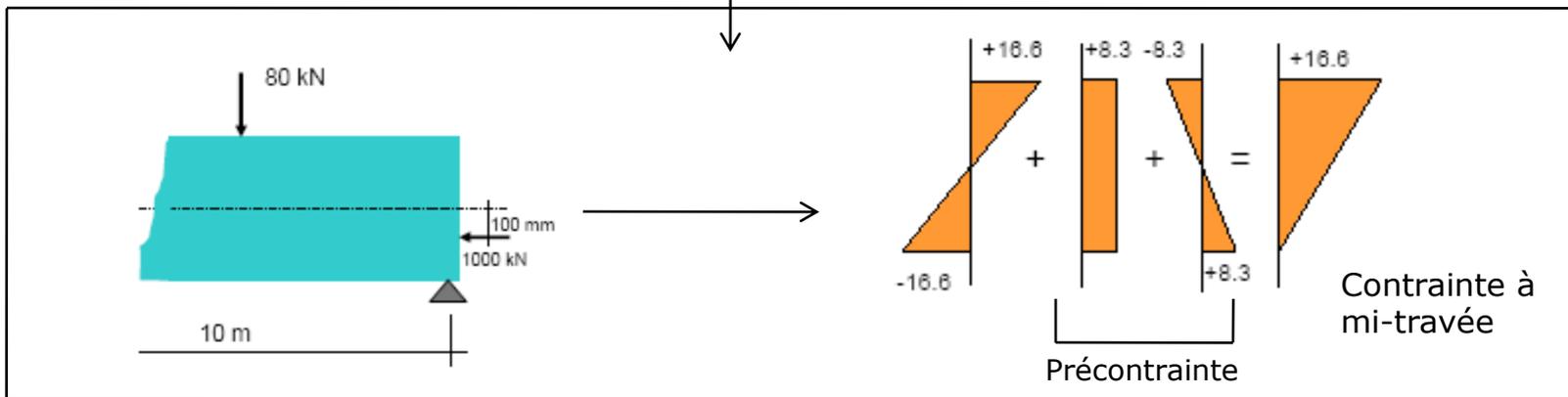
Principe, Types de Précontrainte, Mise en oeuvre

# Principe

La précontrainte sur une structure consiste à appliquer sur celle-ci un effort permanent de compression de manière à éliminer les zones de traction : le béton résiste très peu à la traction ( $f_t \sim 3\text{ MPa} \sim f_c/10$ )



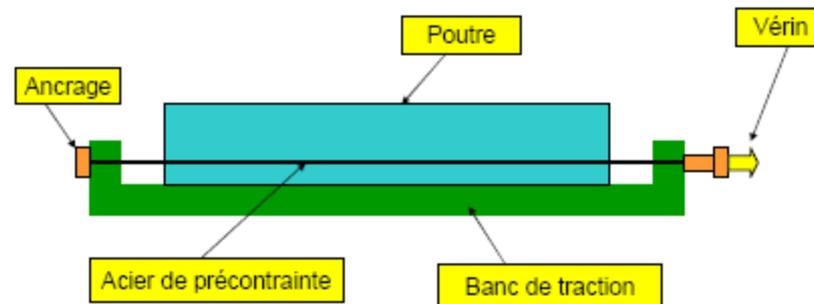
Précontrainte



# Types de précontrainte, Mise en Oeuvre

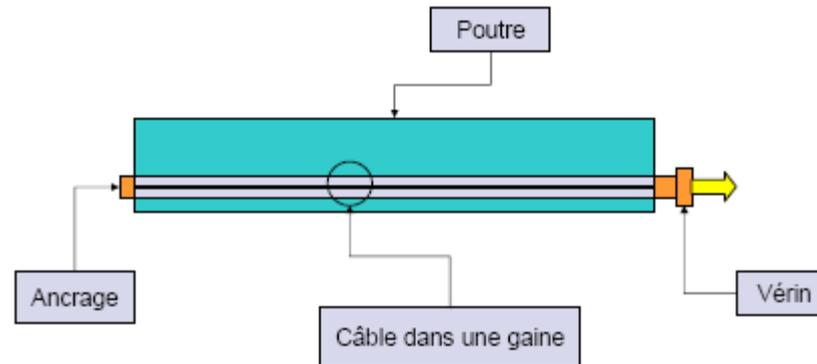
On distingue trois principaux types de précontrainte : la précontrainte par pré-tension et la précontrainte par post-tension et la précontrainte extérieure.

## Précontrainte par pré-tension :



Des fils ou des torons, disposés dans un coffrage d'éléments en béton, sont tendus par un vérin en restant dans leur domaine élastique. Le béton est coulé. Quand le béton atteint une résistance suffisante, on détend les aciers de précontraintes, ce qui implique la compression du béton par adhérence entre ces deux matériaux.

## Précontrainte par post-tension :

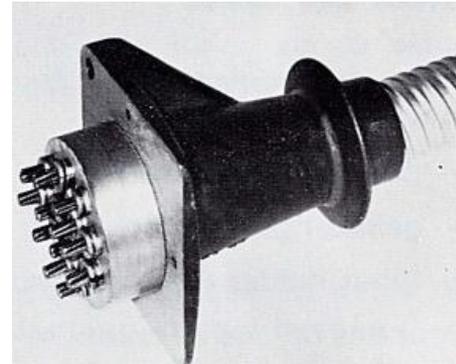


Avant le coulage du béton, on installe des gaines à l'intérieur de la pièce à précontraindre. Le béton est coulé. Quand il atteint une résistance suffisante, on introduit un câble dans la gaine. Une extrémité du câble est fixée par ancrage. L'autre est mobile et sert à la mise sous tension, effectuée grâce à un vérin. Une fois atteinte la tension recherchée, cette extrémité est fixée par une clavette. On injecte alors un coulis au sein de la gaine.

Précontrainte extérieure : elle se base sur le même principe que la précontrainte par post-tension. Cependant les gaines ne sont pas noyées dans le béton.

## Description technologique d'un système de précontrainte :

- câbles : ils sont fabriqués en acier à haute résistance ( $f_u > 1500$  MPa). Ils se présentent sous forme de monotoron ou de faisceaux de torons. On les fixe à l'aide de clavettes.

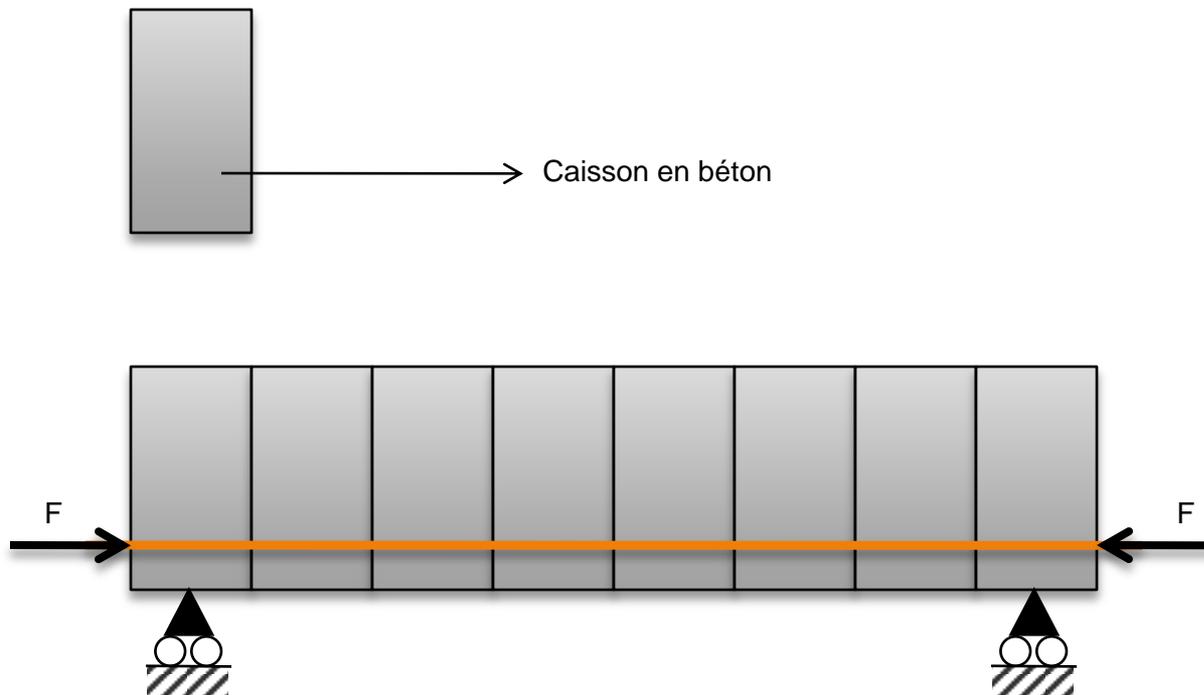


- gaines : elles sont fabriquées le plus souvent en feuillard d'acier, éventuellement zinguées. Il existe aussi des gaines en polyéthylène, adaptées à un environnement agressif (précontrainte extérieure).



Dans le cas d'une poutre-caisson, la précontrainte par post-tension est utilisée. Elle permet d'assembler les différents caissons les uns avec les autres et d'obtenir au final une poutre homogène précontrainte.

Principe :

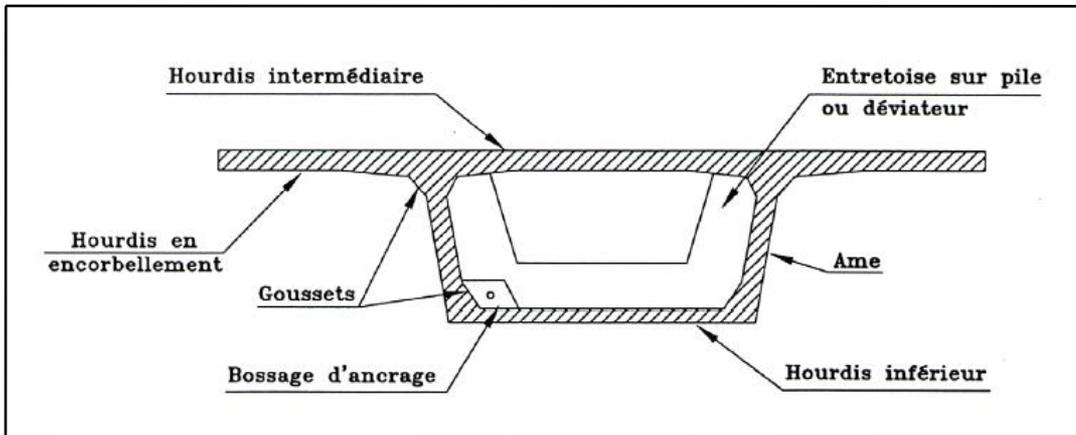




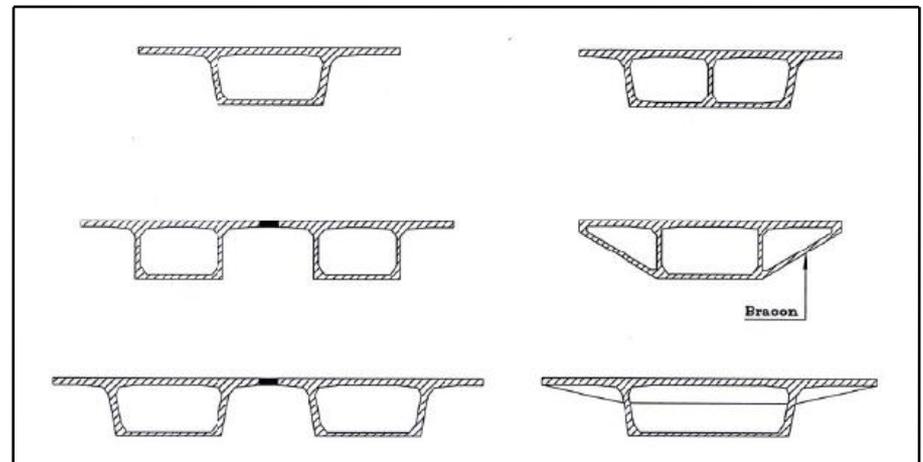
# POUTRE-CAISSON

Généralités

Un caisson est un élément préfabriqué en béton armé. L'assemblage de plusieurs caissons permet d'obtenir une poutre-caisson.



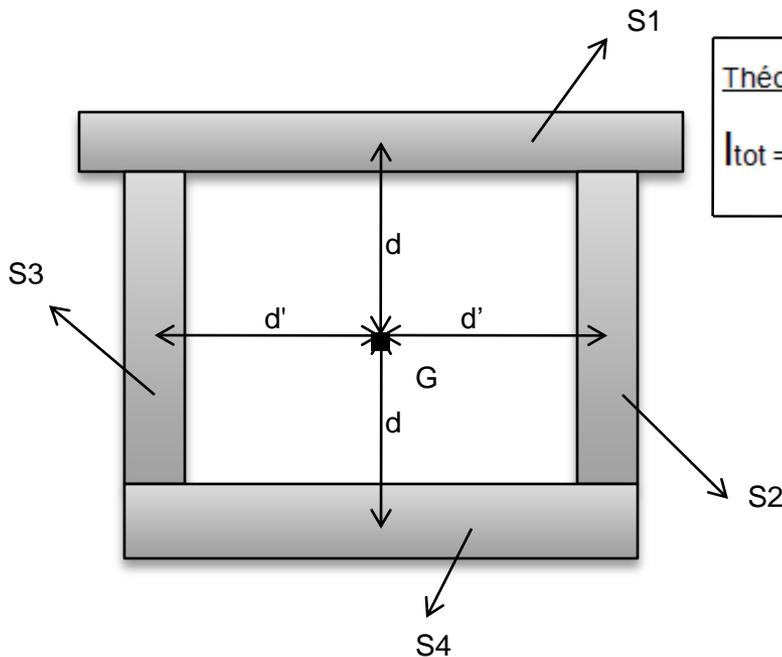
Coupe transversale d'un caisson



Différents types de caissons

# Principe

Une poutre-caisson, comme une poutre ordinaire, doit reprendre majoritairement la flexion. Pour cela, il faut que l'inertie de la poutre soit la plus grande possible.



Théorème de Huyghens :

$$I_{\text{tot}} = I_{S1} + S1 \times d^2 + I_{S2} + S2 \times d'^2 + I_{S3} + S3 \times d'^2 + I_{S4} + S4 \times d^2$$

Pour augmenter l'inertie totale de la poutre, une solution est d'augmenter les différentes surfaces de la poutre. Le poids propre de l'ouvrage augmente dans ce cas-là.

Une autre solution est d'augmenter les distances  $d$  et  $d'$ . Une poutre-caisson se base sur cette solution.

Technologiquement, on utilise la précontrainte par post-tension pour l'assemblage des caissons.

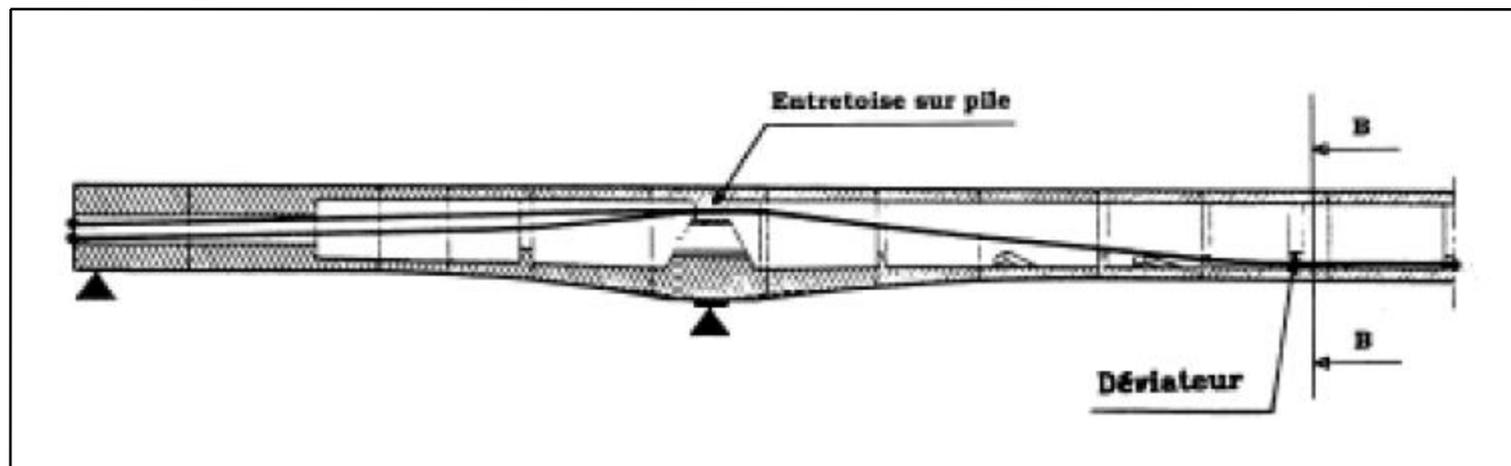
On trouve deux types de câbles dans ce type d'ouvrage.

Les câbles de fléau servent à l'assemblage des caissons pendant la phase de construction.

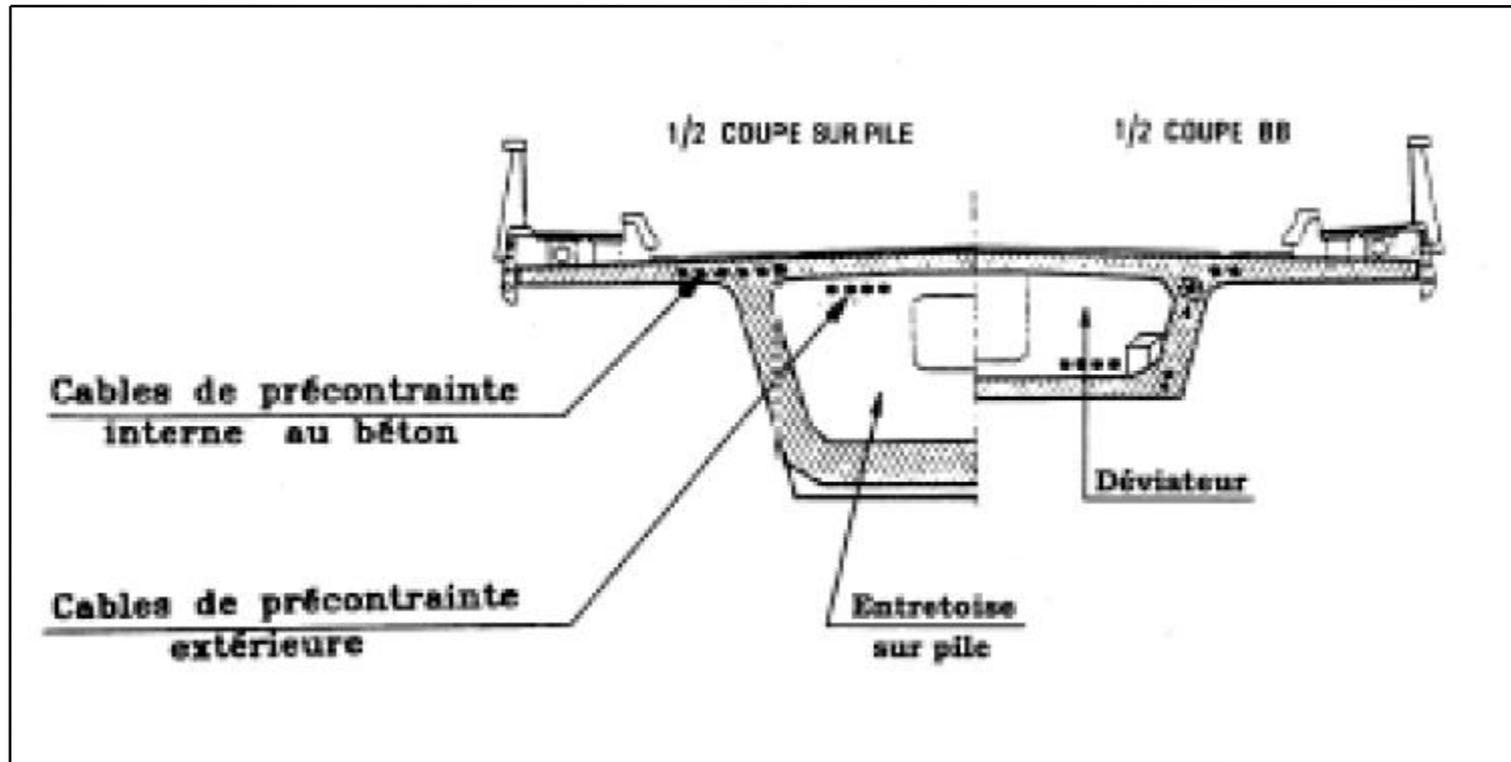
Les câbles de continuité sont les réels acteurs de la précontrainte. Ils assemblent définitivement les caissons entre eux.

Une poutre-caisson est souvent précontrainte par des câbles de continuité internes et/ou externes. La méthode externe est de plus en plus utilisée depuis les années 1980 : facilité d'inspection des câbles, de remplacement et de « retension ».

Câbles de continuité externes



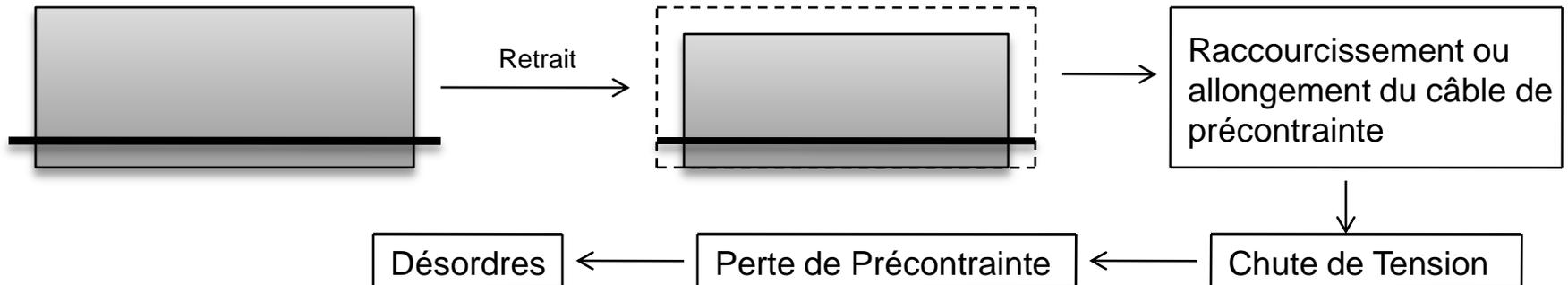
## Coupe transversale d'une poutre-caisson



Les câbles de précontrainte sont situés au niveau du hourdis inférieur en travée pour reprendre la flexion. Au niveau des piles, ils sont situés au niveau du hourdis supérieur dû à l'inversion de moment.

Pour ce type de structures précontraintes, les phénomènes de retrait et de fluage du béton ont un impact important.

Par ces phénomènes, on observe tout d'abord un raccourcissement ou un allongement des structures.



D'autre part, dans le cas d'une poutre-caisson asymétrique, le retrait et le fluage implique des déformations différentielles au cours du temps dans la structure. Ce comportement différé des éléments en béton est l'objet de notre étude.

Commençons par ailleurs par les bases théoriques concernant le retrait et le fluage du béton.



# Retrait et Fluage du Béton

Comportement différé des structures en béton

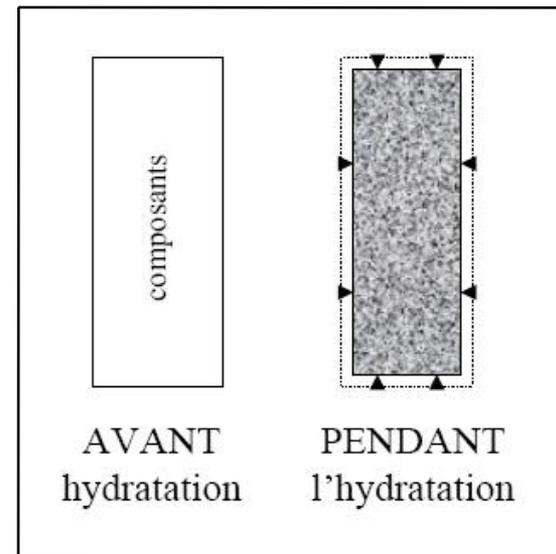
# Retrait du Béton

Le retrait est un phénomène qui se caractérise par une variation volumique négative des éléments en béton. Il provient essentiellement des réactions chimiques ayant lieu dans le matériau, des variations de température, et de l'évaporation de l'eau au sein des éléments en béton.

On décompose le retrait en un *retrait endogène*, un *retrait de dessiccation* et un *retrait thermique*.

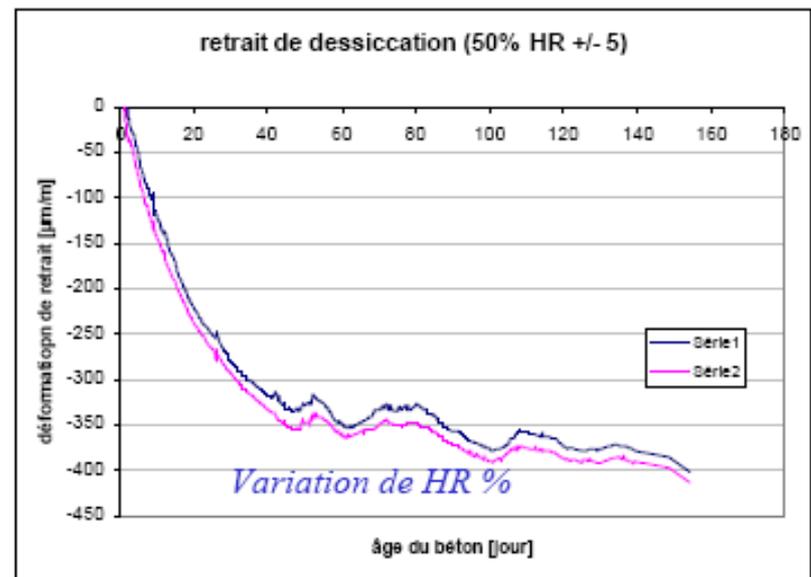
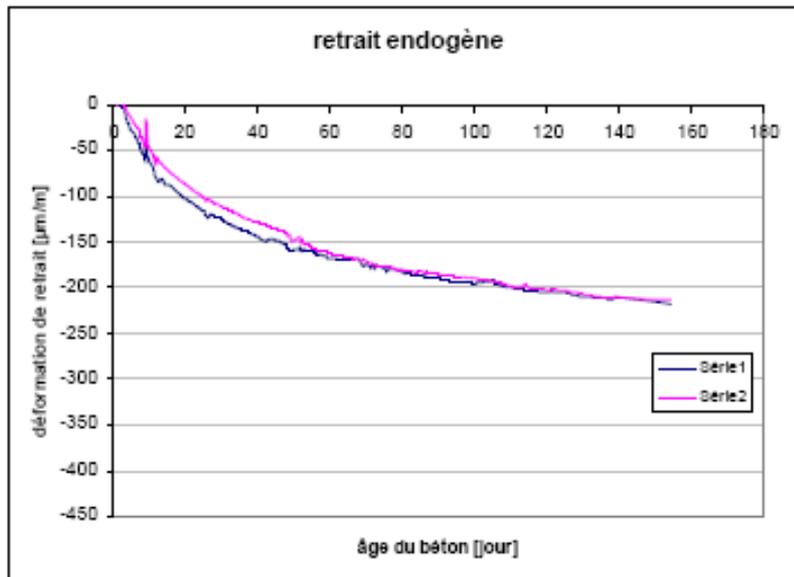
Le retrait endogène est un phénomène de contraction pendant l'hydratation, car le volume des produits de cette réaction est inférieur au volume des produits initiaux.

Pendant la prise, le béton devient solide, il y a alors création de pores au sein de l'élément pour compenser la contraction (contraction de Le Châtelier).



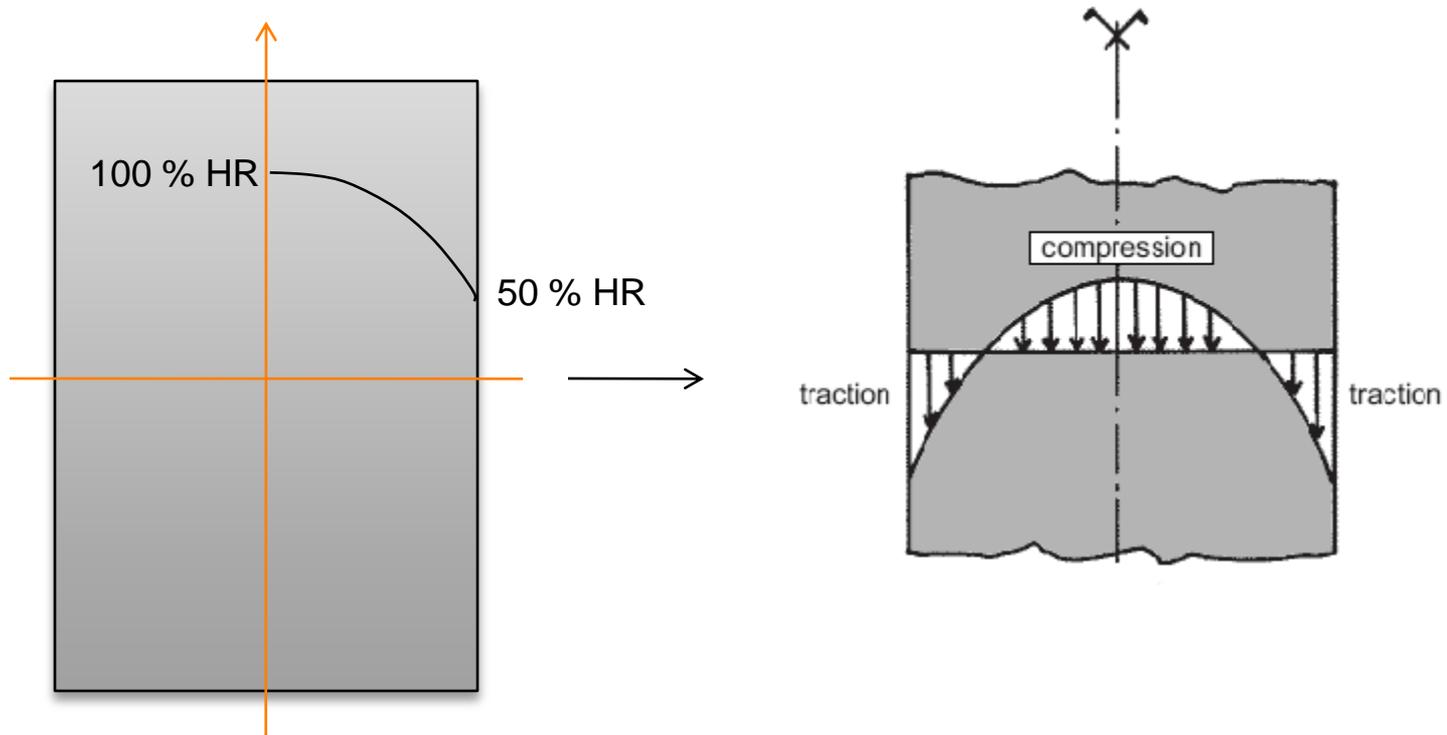
Le retrait de dessiccation est dû à l'échange d'humidité entre le béton et le milieu extérieur. Cet échange s'effectue par diffusion via les pores formés au sein du matériau.

Contrairement au retrait endogène fonction exclusivement du temps, le retrait de dessiccation est fonction du temps, de l'humidité relative extérieure et de la dimension des pores.

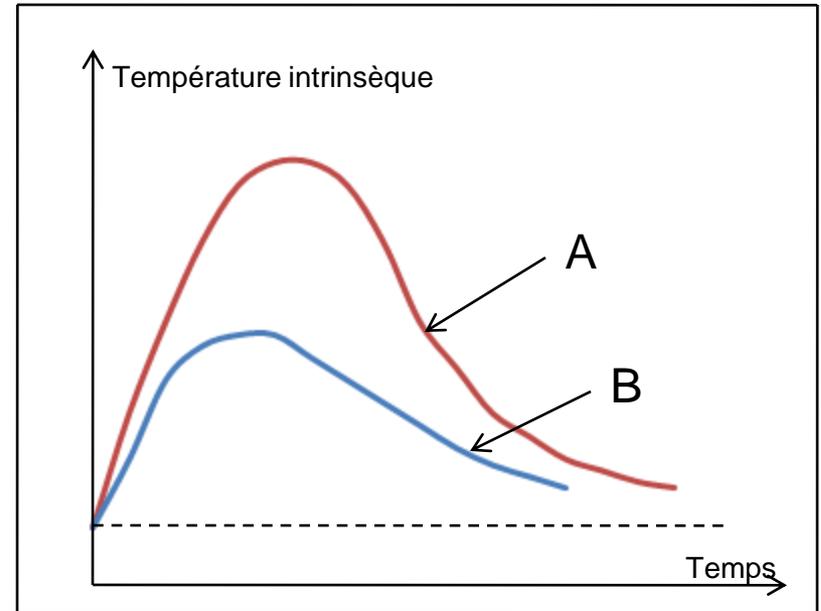
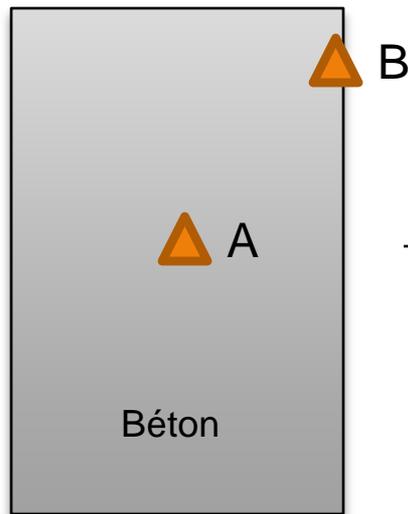


Essai sur Béton - LCPC

Le retrait de dessiccation est aussi fonction de la massivité de l'ouvrage. L'humidité relative au cœur de structures massives diminue beaucoup moins vite que celle au niveau des surfaces libres. Les surfaces libres se trouvent alors en traction, contrairement au cœur comprimé. De ce fait, les déformations ne sont pas uniformes dans la structure.



On peut prévoir aussi des déformations thermiques non uniformes : variation de température journalière et saisonnière ( $-10^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C}$ ), et variation intrinsèque de température due à l'hydratation du béton ( $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 70^{\circ}\text{C}$ ).



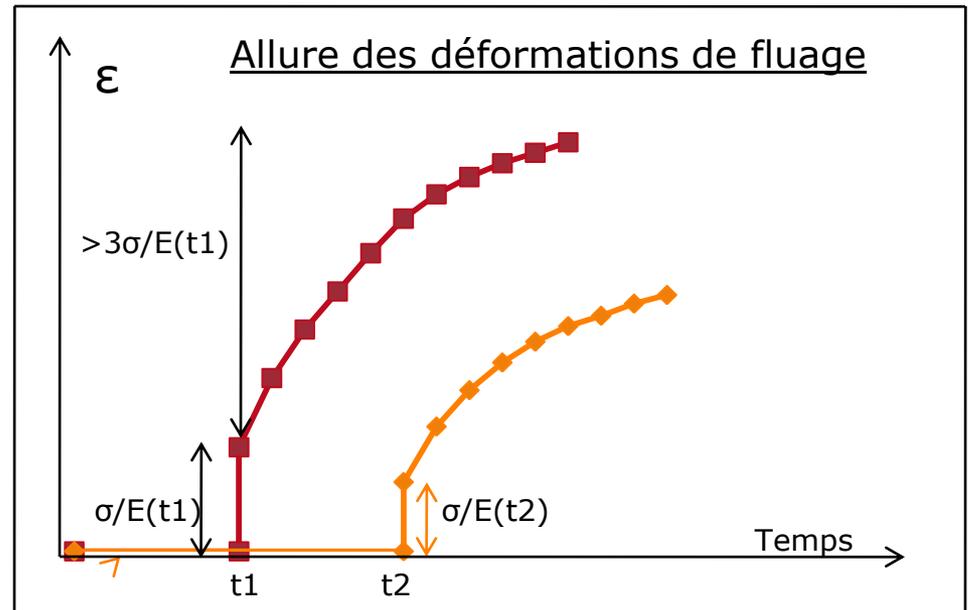
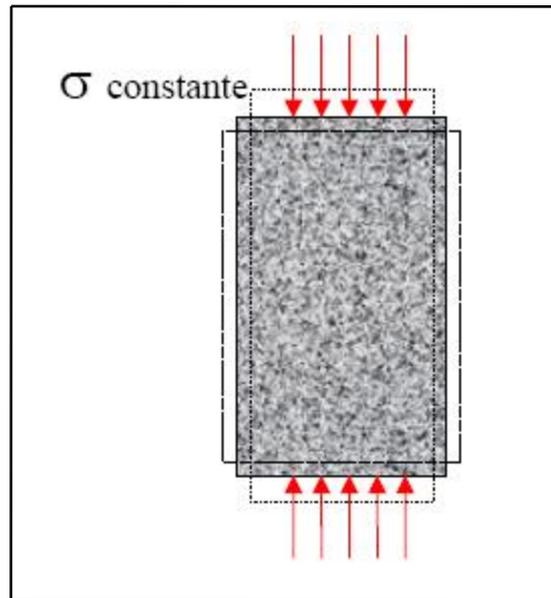
Allure de la température au sein d'une structure

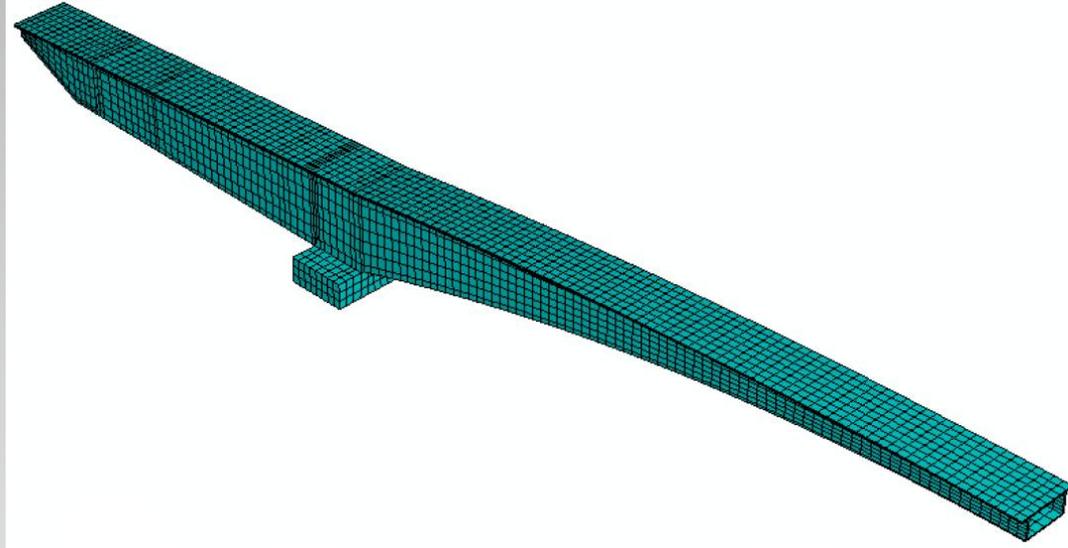
De plus, elle accélère le retrait de dessiccation, influençant des déformations différées non uniformes.

# Fluage du Béton

Le fluage est un phénomène de déformation différée du matériau, sous chargement constant de longue durée.

Pour une même pièce, le fluage dépend du chargement imposé, de sa durée, de l'humidité relative, de l'âge du béton.



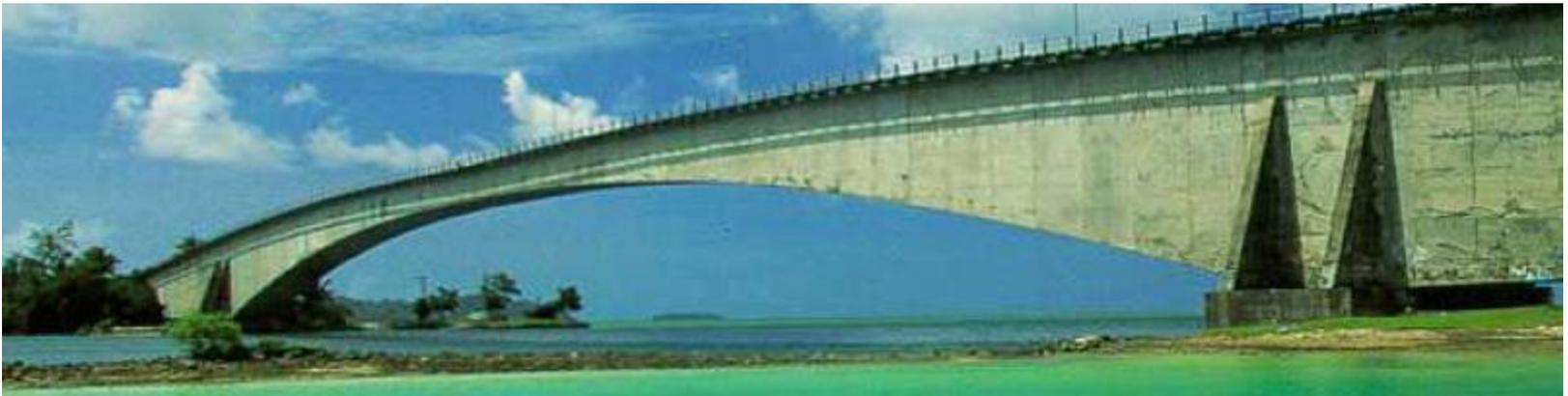


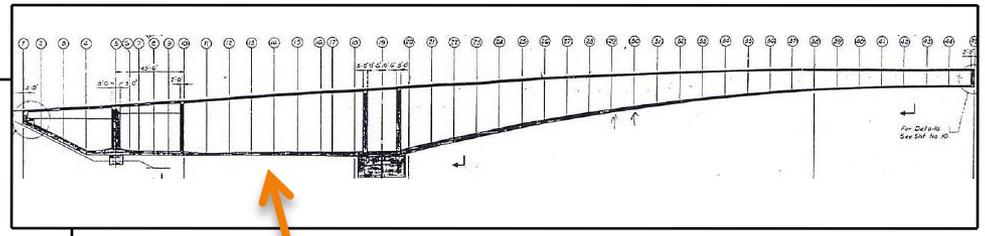
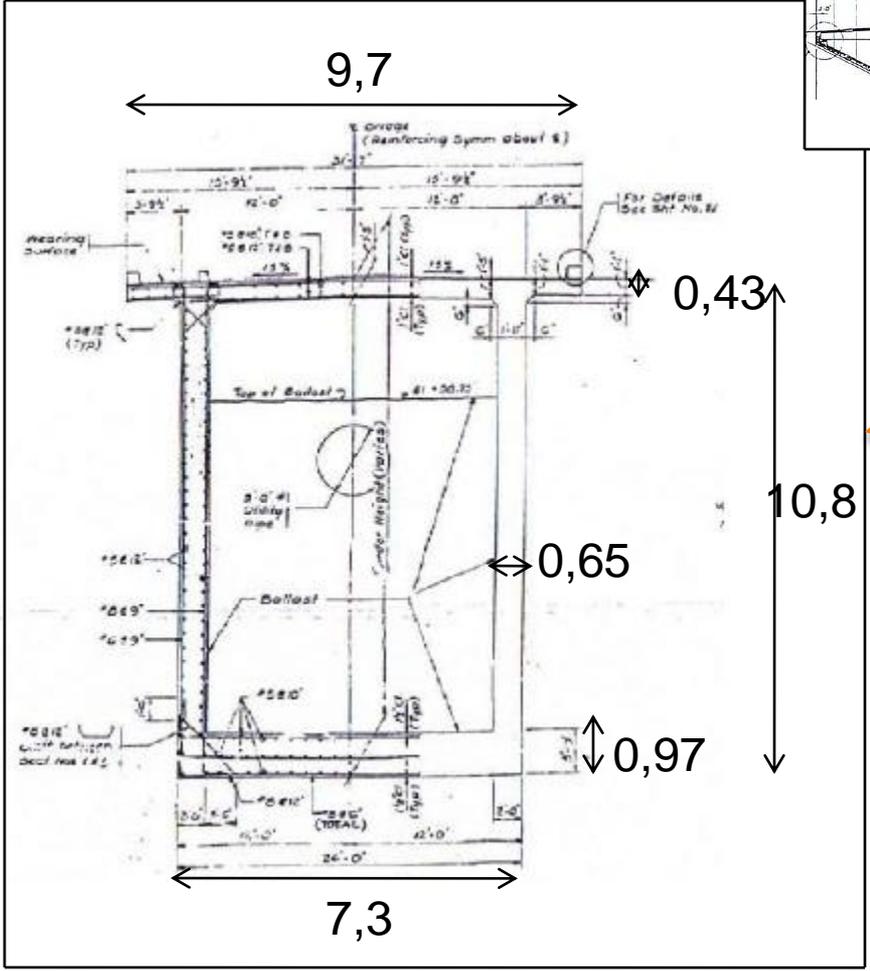
# POUTRE-CAISSON ASYMETRIQUE

Effet du retrait sur le comportement structurel  
Calcul Eléments Finis

Nous allons étudier ici un cas particulier d'une poutre-caisson asymétrique, et principalement son comportement structurel au phénomène de retrait.

Prenons le cas du Pont Koror-Babeldaob à Palau. Ce pont a été construit en 1977. Lors de la conception, les ingénieurs avaient prévus d'obtenir une flèche maximale à mi-travée comprise entre 0,55 et 0,67m. Cependant après 18 ans de service, la flèche était de 1,39m, accompagnée d'une perte de précontrainte (perte de tension dans les câbles de précontrainte). Après une « retension » des câbles en 1996, le pont s'est écroulé.



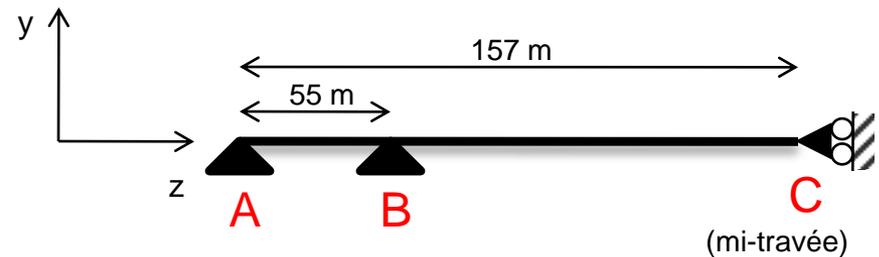
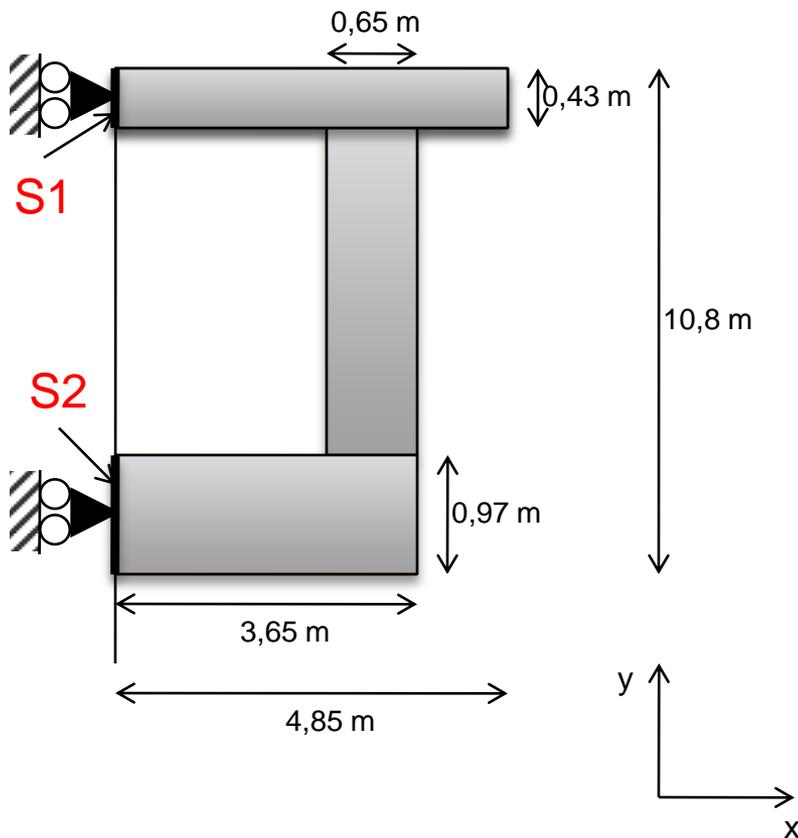


Section A

Ce pont présente une dissymétrie entre hourdis. Le hourdis inférieur est plus épais que le hourdis supérieur sur une grande partie du pont.

L'objectif de cette partie est de quantifier l'effet des phénomènes de retrait et de température sur une poutre-caisson asymétrique. On simplifie pour cela la structure du pont en considérant une section transversale constante.

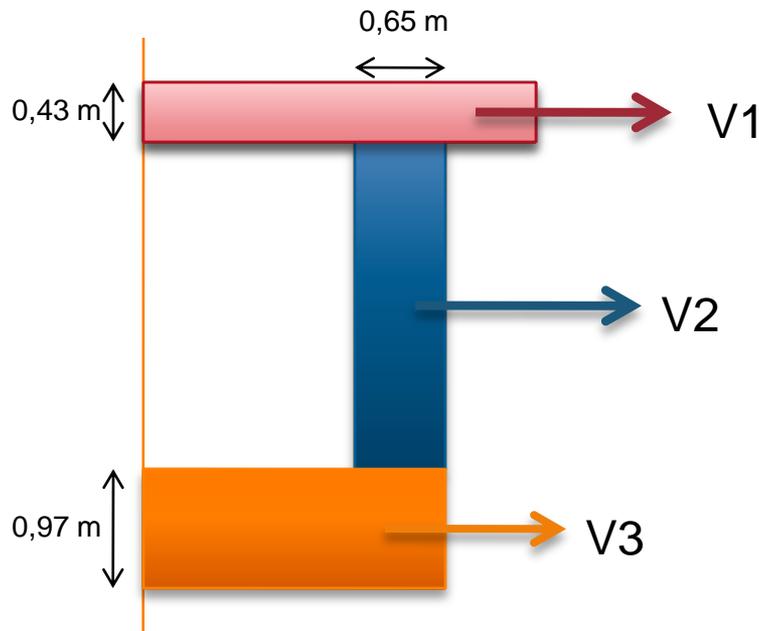
### Modélisation :



**Surface S1 et S2 :** déplacement bloqué selon x

**Point A et B :** déplacement bloqué

**Point C :** déplacement bloqué selon z



Au jeune âge : Température non uniforme  
(Température d'hydratation)

$$T_3 > T_2 > T_1$$



$$\epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1 > 0$$

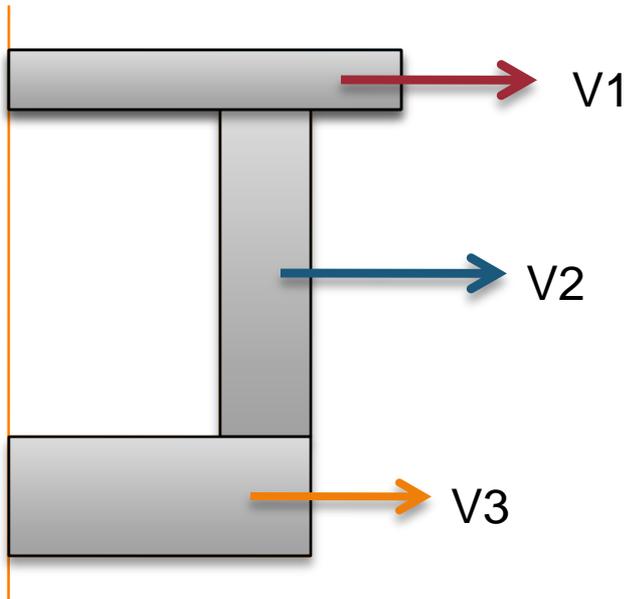
A plus long terme : retrait de dessiccation non uniforme

$$\dot{\epsilon}_1 < \dot{\epsilon}_2 < \dot{\epsilon}_3 < 0$$

On modélise l'effet de la température et du retrait par **température équivalente** :

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_{th} \longrightarrow \epsilon = \sigma/E + \alpha(T-T_0) \longrightarrow E\epsilon = \sigma + E\alpha(T-T_0)$$

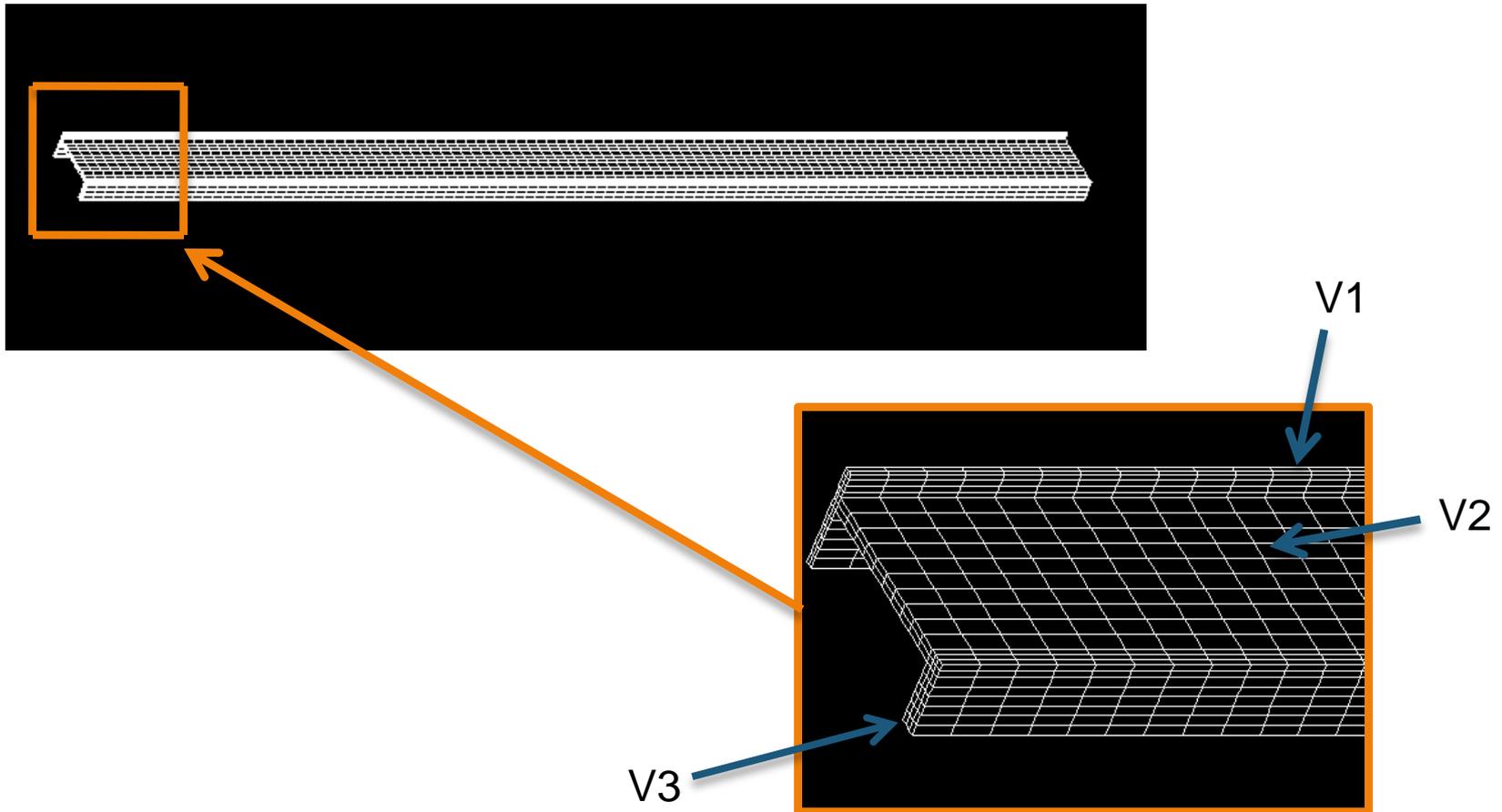
Contrainte



	Jeune Age : Température	Long Terme : Retrait
T1	40	-60
T2	55	-30
T3	70	0

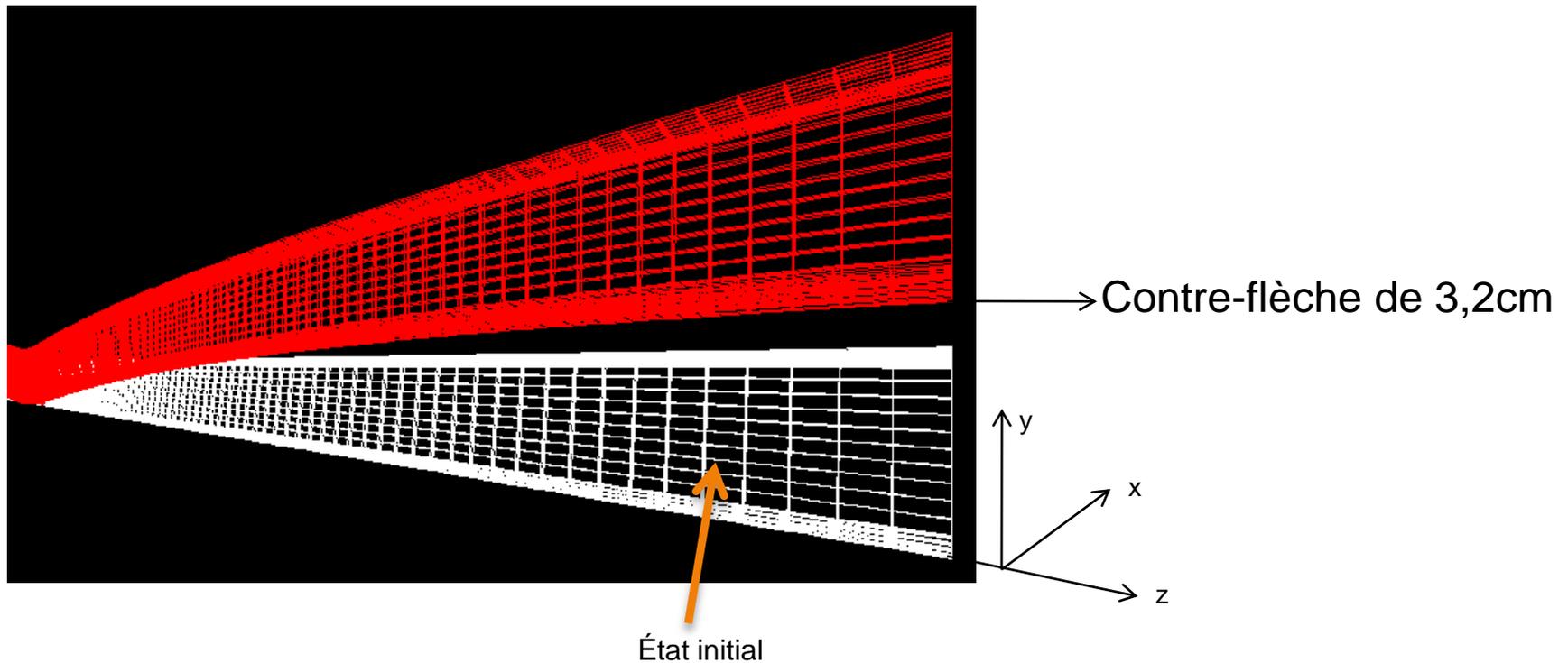
Pour quantifier l'effet de ces phénomènes, nous proposons d'effectuer un calcul Eléments Finis. On utilise pour cela le logiciel CASTEM.

La première étape est de **générer la structure et de la mailler**.



**Température** : la température d'hydratation provoque une dilatation du matériau. Cependant, le matériau devenant solide, la dilatation est empêchée, ce qui implique des contraintes de compression dans l'ouvrage.

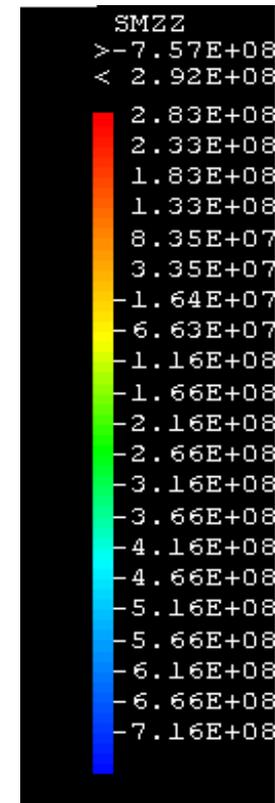
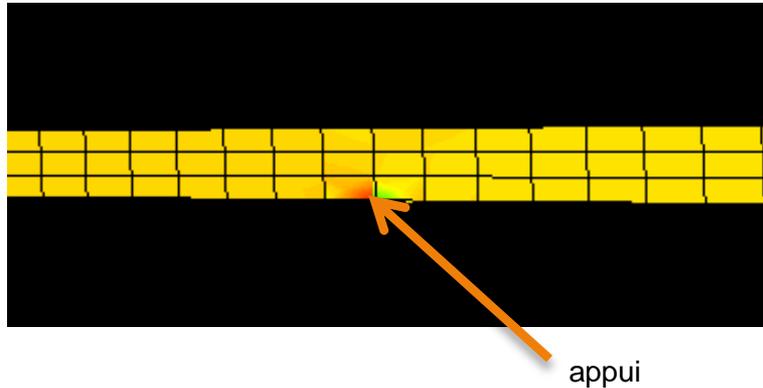
Si l'on considère la température comme seul paramètre (sans poids propre), on obtient l'allure de la déformée suivante :



Les contraintes les plus importantes sont, dans les 3 volumes, les contraintes  $\sigma_{zz}$ . Les autres contraintes dans la structure sont négligeables en travée par rapport à  $\sigma_{zz}$  (dixième de MPa au maximum pour  $\sigma_{xx}$ , sur V1 et V3, et  $\sigma_{yy}$  sur V2).

Ce sont, pour les 3 volumes, des contraintes de compression : dilatation empêchée.

**V3 :**

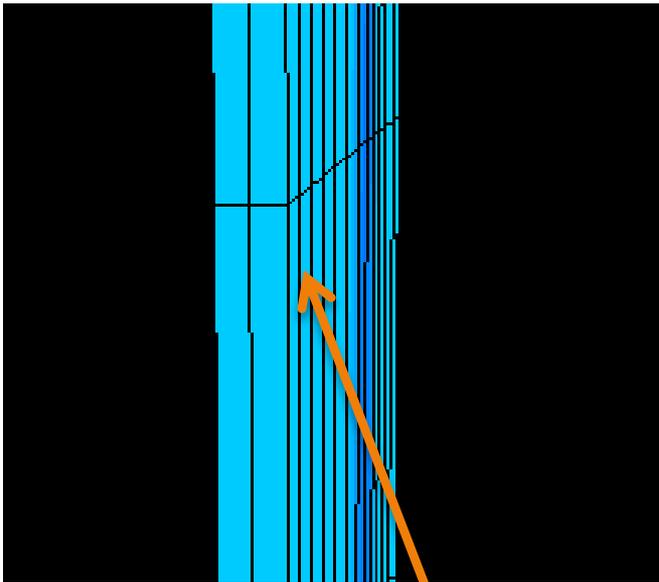


$\sigma_{zz}$  est de l'ordre de -18MPa dans V3;

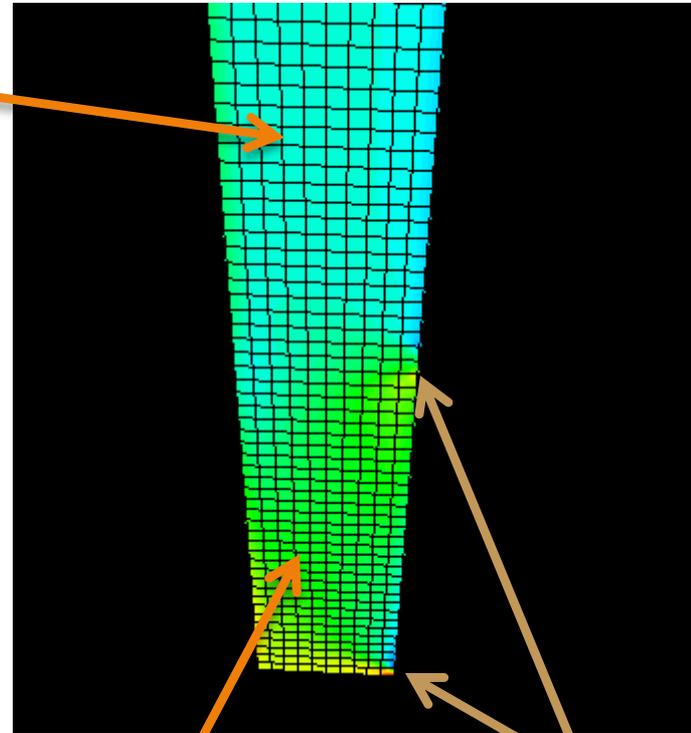
A l'appui, on observe des contraintes très importantes.

Cette valeur correspond à un blocage parfait de l'appui. La valeur est donc plus petite en réalité.

Dans V2,  $\sigma_{zz}$  est de l'ordre de -14MPa.



Dans V1,  $\sigma_{zz}$  est de l'ordre de -8MPa.

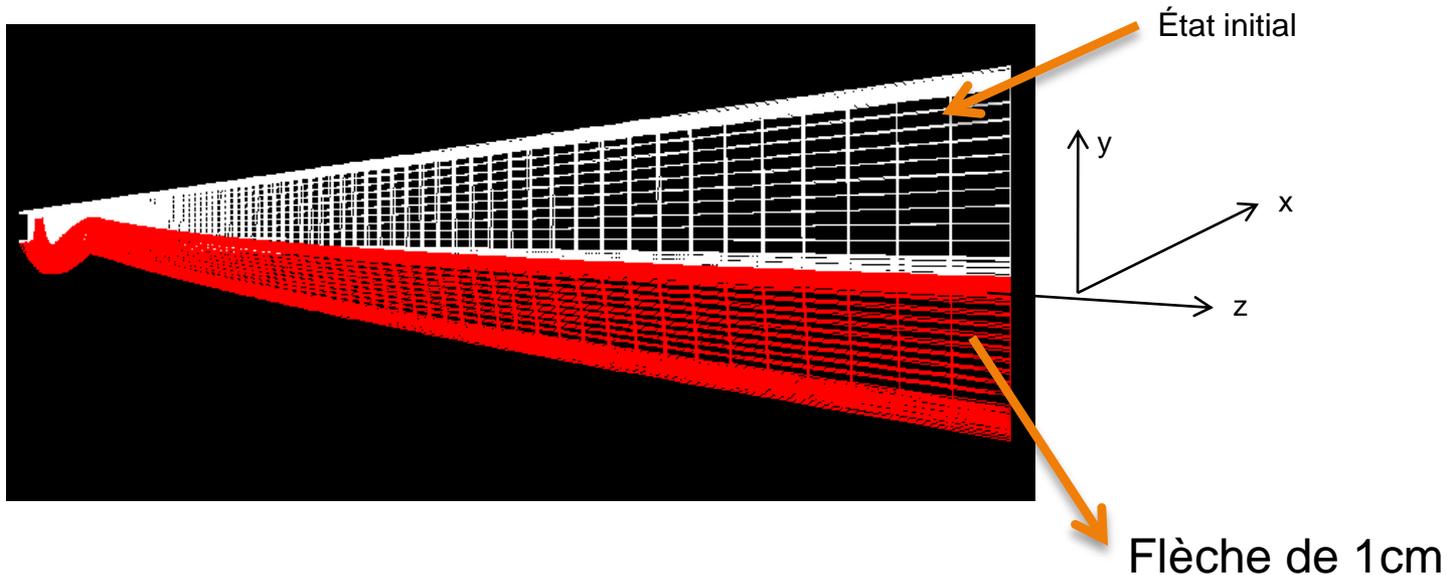


Effet diffus des appuis

appui

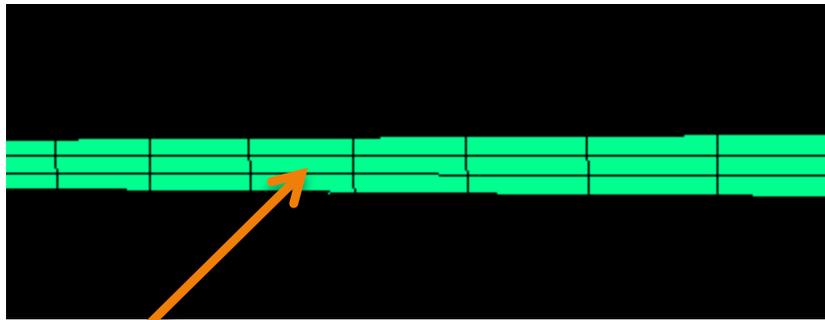
**Retrait de dessiccation** : il provoque une variation volumique négative des structures. Cette variation sera plus importante pour V1 que pour V2, qui elle-même sera plus importante que celle de V3.

Si l'on ne considère que le retrait de dessiccation (sans poids propre), on obtient l'allure de la déformée suivante :

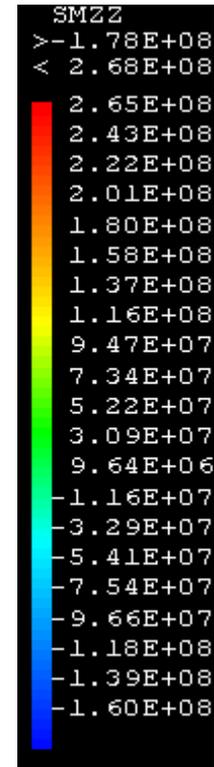


Comme pour la température, les contraintes les plus importantes sont les contraintes  $\sigma_{zz}$ . Les autres sont négligeables devant cette dernière.

Pour V3 :

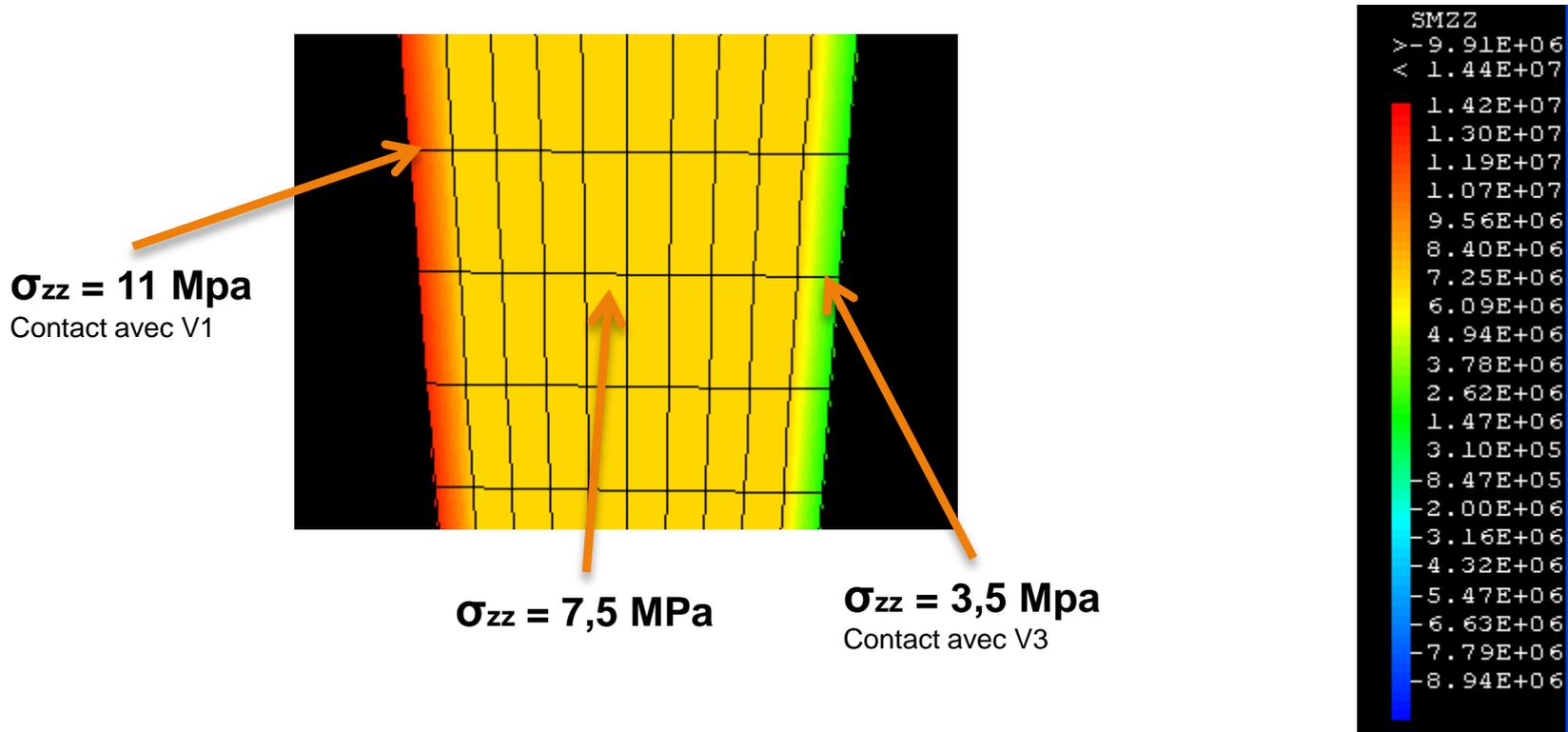


$$\sigma_{zz} = -0,7 \text{ MPa}$$



Le hourdis inférieur subit encore un effort de compression, qui est, somme toute, très faible.

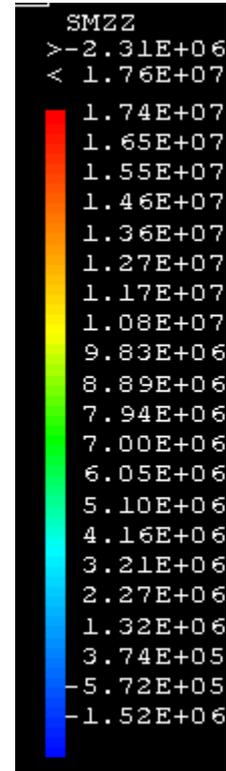
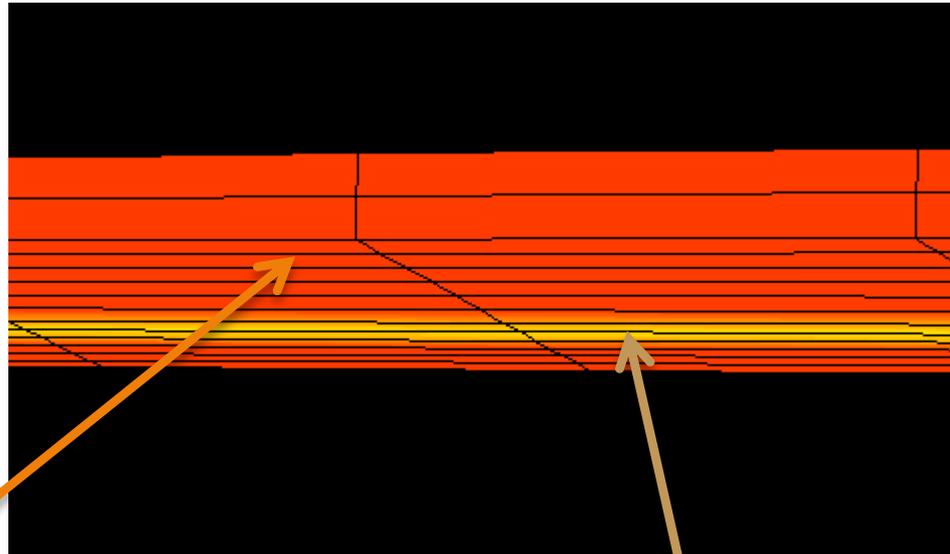
Pour V2 :



Il y a apparition de contraintes de traction dues au retrait de dessiccation : réponse du béton à la contraction.

On prend ici en compte la diffusion des contraintes au niveau des raccords entre âme et hourdis : la discontinuité de section induit des sauts de contraintes dans la structure.

Pour V3 :



$\sigma_{zz} = 16 \text{ MPa}$

Contact avec V2

Un effort de traction apparaît aussi dans le hourdis supérieur.  
Il est tout de même compensé par l'effort de compression induit par le poids propre de l'ouvrage.

En résumé :

effet de la température

	V1	V2	V3
$\sigma_{zz}$ (MPa)	-8	-14	-18

effet du retrait de dessiccation

	V1	V2 sup	V2	V2 inf	V3
$\sigma_{zz}$ (MPa)	16	11	7,5	3,5	-0,7

**Les deux phénomènes de température et de retrait de dessiccation induisent des déplacements verticaux peu conséquents (1cm de flèche pour le retrait). On ne peut donc pas expliquer les problèmes du Pont de Palau par ces seuls phénomènes.**

**Cependant, les contraintes importantes qu'ils induisent dans la structure doivent être pris en compte pour le calcul des sections d'acier et de tension des câbles de précontrainte.**

**Une évaluation des pertes de précontrainte dues à ces phénomènes est aussi importante pour prévoir le comportement structurel d'un ouvrage au cours du temps.**

# QUESTIONS ?

Vous avez à votre disposition un questionnaire avec questions-réponses pour vérifier votre compréhension du sujet