

EPFL

Mesures de structures



Semaine ENAC PENS-203, Diagnostic en ENAC, EPFL, 2019

Olivier Burdet

Participants

EPFL

- | | | | |
|---------------------|-----|-------------------|----|
| ● Saad ABDELJALIL | GC | ● Leon ECONOMIDIS | AR |
| ● Esther BARBERIS | SIE | ● Pablo GARCIA | GC |
| ● Théo BOUTROS | SIE | ● Tristan KRAMER | AR |
| ● Aurélien CLERC | GC | ● Dumas RIBADEAU | AR |
| ● Clément COSSON | SIE | ● Vlora SELJMANI | AR |
| ● Mathieu DESBOEUFS | GC | ● Sözdar TOKTAS | AR |
| ● Camille DROSS | SIE | ● Timon VOIDE | AR |

Contenu de la présentation

- Pourquoi mesurer les structures ?
- Que mesure-t-on ?
- Stratégie et organisation
- Etude de cas : Ponts de Riddes sur le Rhône (A9, VS)
- Vos mesures : pont Aval sur la Lutrive
 - Pots hydrostatiques
 - Comparateur
 - Inclinomètres
 - Distance laser
 - Température(s)

Pourquoi mesurer les structures ?

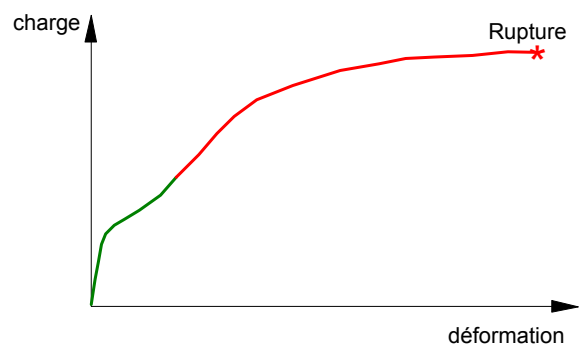
- Par intérêt scientifique (recherche)
- Parce qu'on a des doutes sur leur comportement (contrôle et observation)

Etat limite ultime

- Sécurité structurale

Etat limite de service

- Déformations
- Fissuration
- Vibrations





IBETON – Laboratoire de construction en béton



Mesures de Structures

En service !



© AP IBETON – Laboratoire de construction en béton

En construction !



Que mesure-t-on sur les structures ?

EPFL

- **Forme**
- **Déformations**
(flèches, rotations, allongements spécifiques, etc.)
- **Ouvertures des fissures** et des joints
- **Propriétés des matériaux**
 - Résistance, carbonatation, potentiel électrochimique du béton
 - Nuance et dureté de l'acier
- **Température**

Mesure de forme et mesure directe de déformation **EPFL**

Mesures de forme

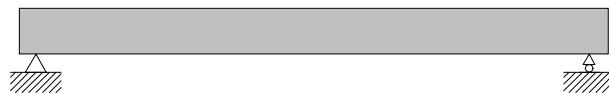
- Relèvement topographique
- Relèvement géodésique
- Positionnement GPS
- **Mesures de distance**
- Semis de points (scanner laser)

Mesure de déformation

- Toutes les mesures de forme par différence
- **Nivellement hydrostatique**

Mesure indirecte de déformation **EPFL**

- **Inclinométrie (rotations → déformations)**
- **Extensométrie (allongements → courbures → déformations)**
 - Jauges de déformations («de contraintes»)
 - Capteurs à fibres optiques
 - Mesures directes d'extensométrie

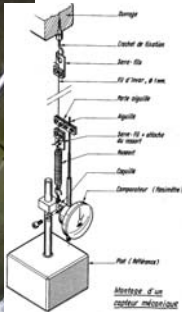


Les méthodes que vous utiliserez

EPFL



Distance par laser



Distance par fil tendu

Nivellement hydrostatique



Inclinomètres



Température



IBETON – Laboratoire



Mesures de Structures

Stratégie et organisation de la mesure

EPFL

- Mesurer systématiquement (même période, même conditions)
- Mesures redondantes
- Utiliser plusieurs méthodes
- Etablir et suivre une procédure (feuilles standard)
- Noter les observations
- Prendre des photos
- Dépouiller rapidement

IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Dépouillement direct des pots hydrostatiques

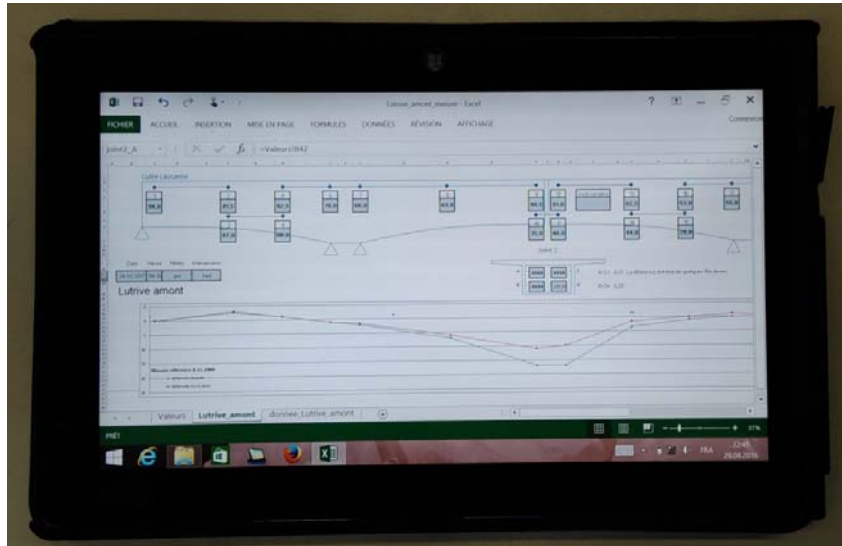
EPFL



A tablet displaying a data entry form for hydrostatic tests. The form includes fields for Date, Heure, Météo, and Intervenant, followed by a table for recording measurements from seven pots.

Date	24.03.2017
Heure	08:10
Météo	gris
Intervenants	fred
Numéro pot	Valeur [mm]
1	94,0
2	81,5
3	87,0
4	86,0
5	82,5
6	70,0
7	68,0

IBETON – Laboratoire de construction en béton



Mesures de Structures

Suffit-il de mesurer ? NON !

EPFL

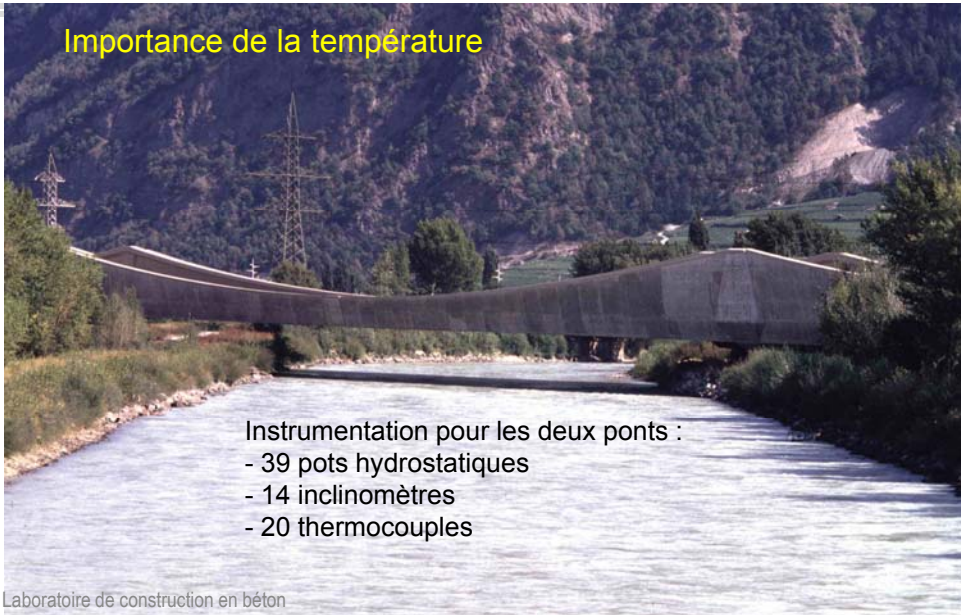
- Il faut interpréter les résultats !
- Il faut répéter les mesures !
- Il faut se méfier des changements !
- IL FAUT SE MÉFIER DE LA TEMPÉRATURE !

IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Etude de cas : Ponts de Riddes sur le Rhône (A9, VS) EPFL

Importance de la température



Instrumentation pour les deux ponts :
- 39 pots hydrostatiques
- 14 inclinomètres
- 20 thermocouples

IBETON – Laboratoire de construction en béton

Structures

Inclinomètre dans son boîtier de rotation EPFL

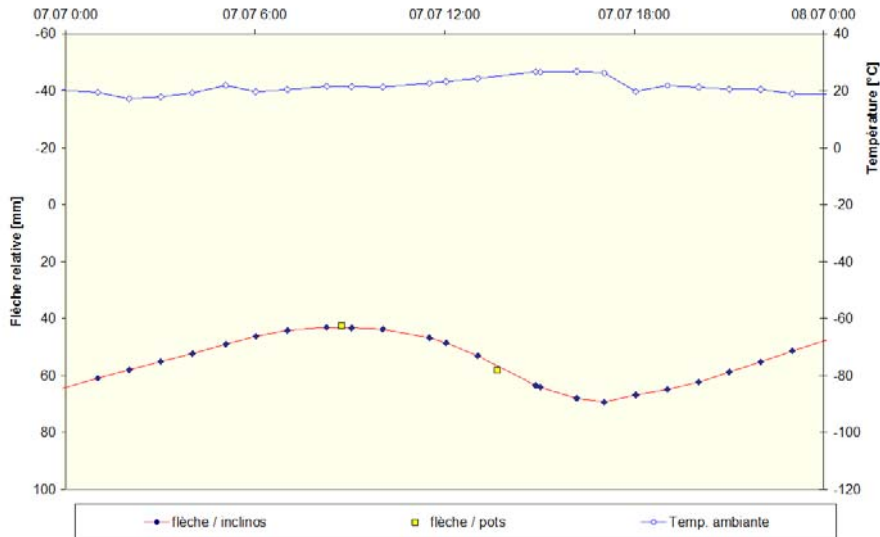
EPFL



IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

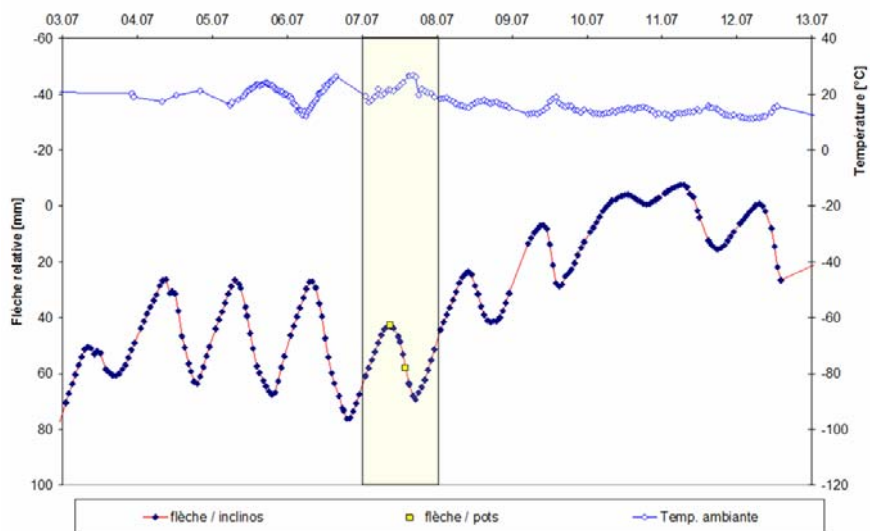
Mesures sur 24 heures



IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Mesures sur 10 jours

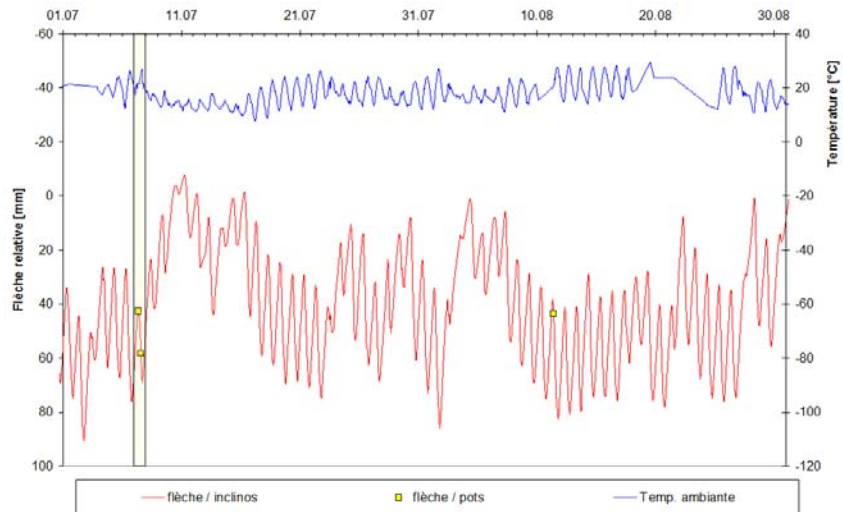


IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Mesures sur 2 mois

EPFL

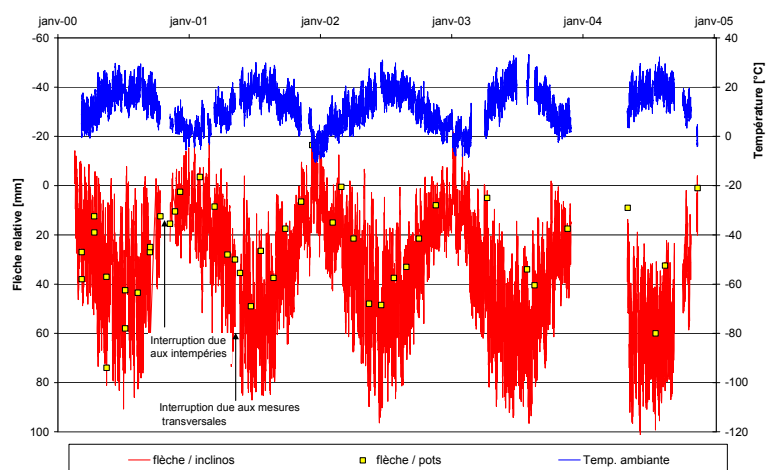


IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Mesures sur 4 ans

EPFL

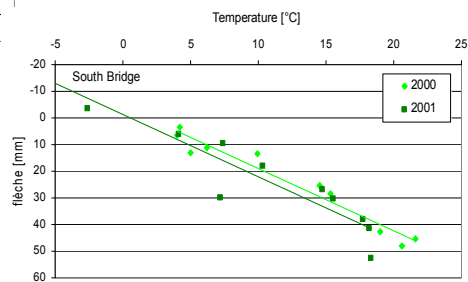
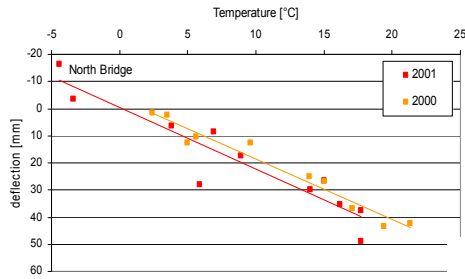


IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Influence de la température

EPFL



IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

EPFL

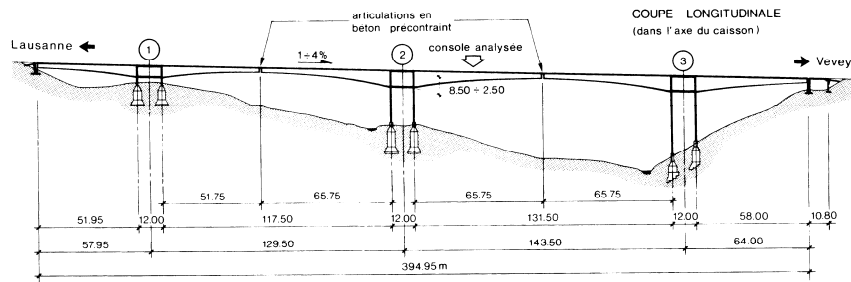
Vos mesures

Pont aval sur la Lutrive

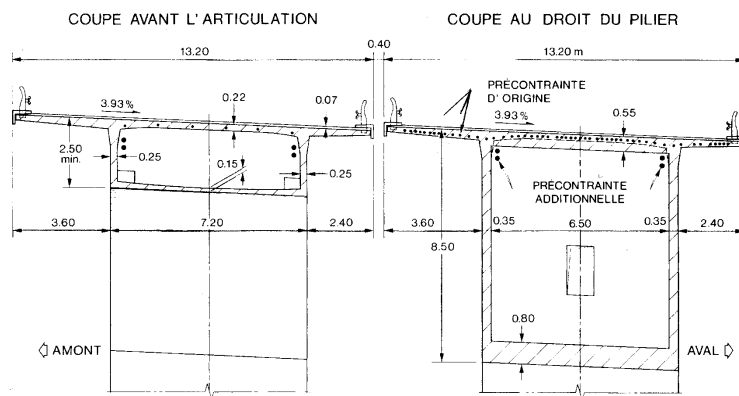


IBETON – Laboratoire de construction en béton

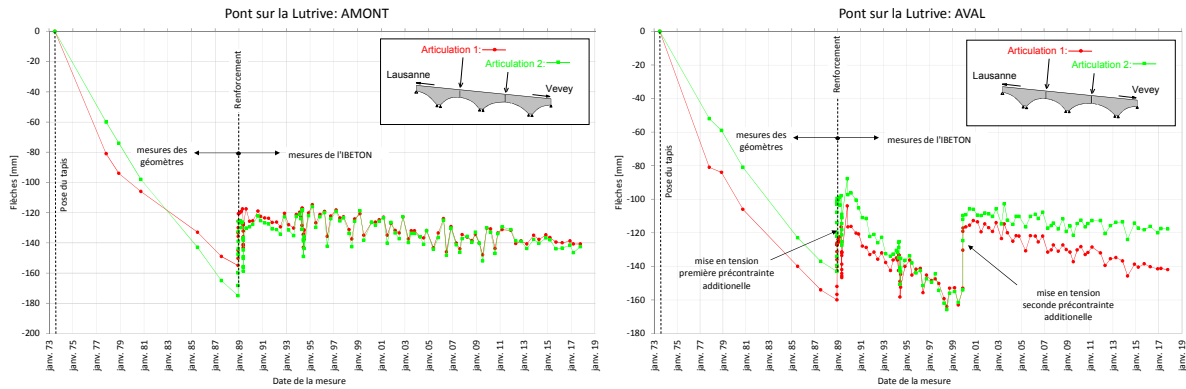
Ponts sur la Lutrive - élévation



Ponts sur la Lutrive - coupes



Pourquoi les ponts sur la Lutrive ?

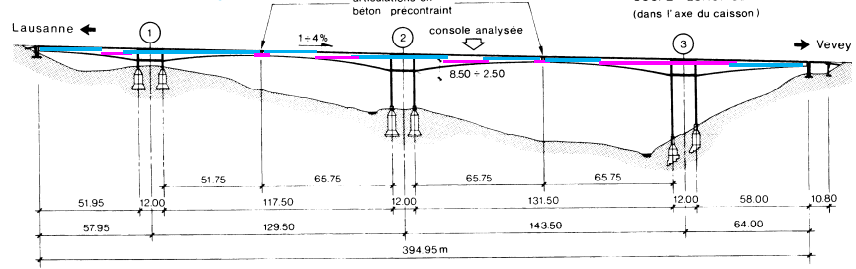


Dispositifs de mesure

- Réseau de 33 pots hydrostatiques
- 4 inclinomètres fixes, mesure automatique par ordinateur
- 4 Thermocouples noyés dans le béton près de l'articulation côté Vevey
- Thermomètres dans et sous le pont
- Fil tendu entre le pont et le sol
- Mesure de distance par laser depuis le sol

But : maximiser le nombre de mesures (pour pouvoir détecter des erreurs)

14 circuits, 33 pots hydrostatiques

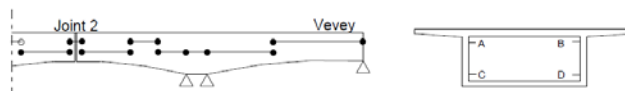
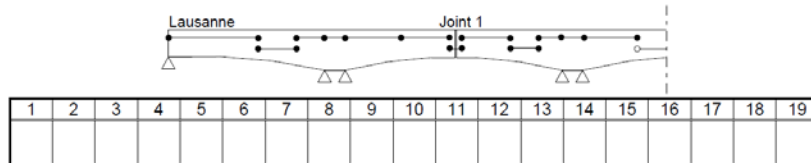


Dépouillement des pots hydrostatiques

Principe des vases communicants – évident mais pas si simple...

Feuille de mesure Lutrive Aval

Pont sur la Lutrive aval



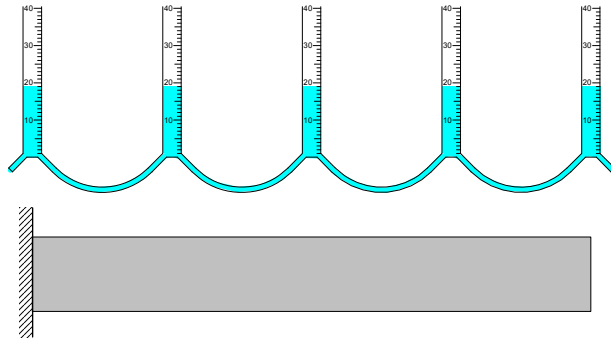
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Joint	A	B	C	D	Clinomètre	Joint	A	B	C	D	Clinomètre
1						2					

Date	Heure	Météo	Humidité	Température (vers le pot 22)		
				air	dalle sup.	dalle inf.

Mesure initiale: tous les points au même niveau

EPFL

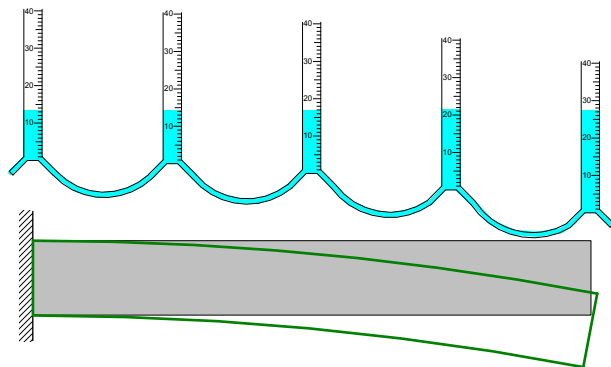


IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Mesure après déformation

EPFL

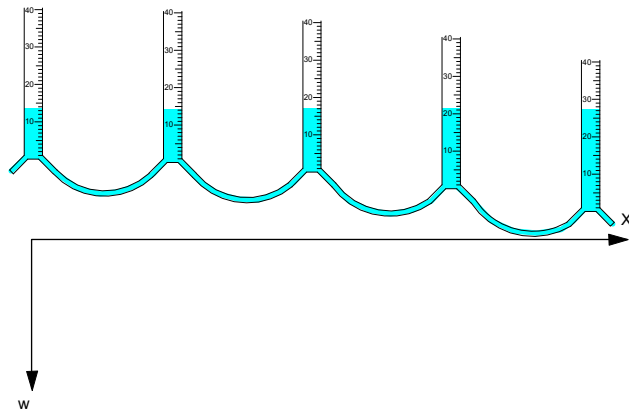


IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Mesure après déformation - Graphique

EPFL

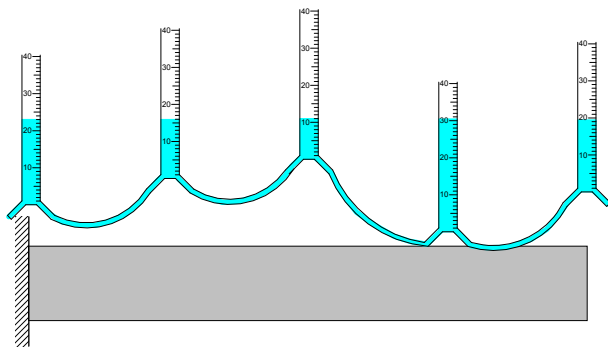


IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Mesure initiale: configuration réelle

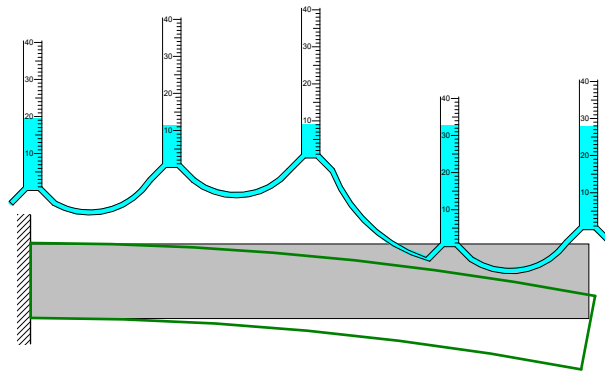
EPFL



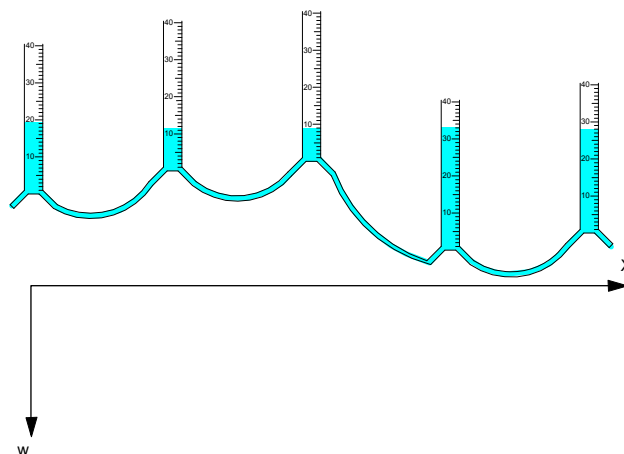
IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Mesure réelle après déformation

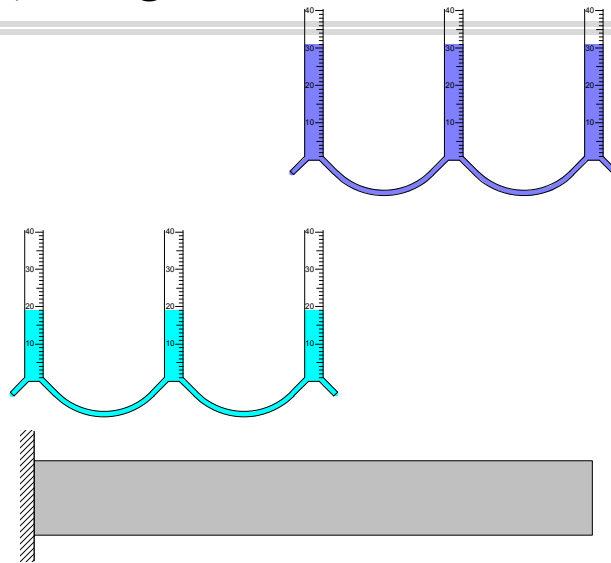


Mesure réelle après déformation



Deux circuits, configuration idéale

EPFL

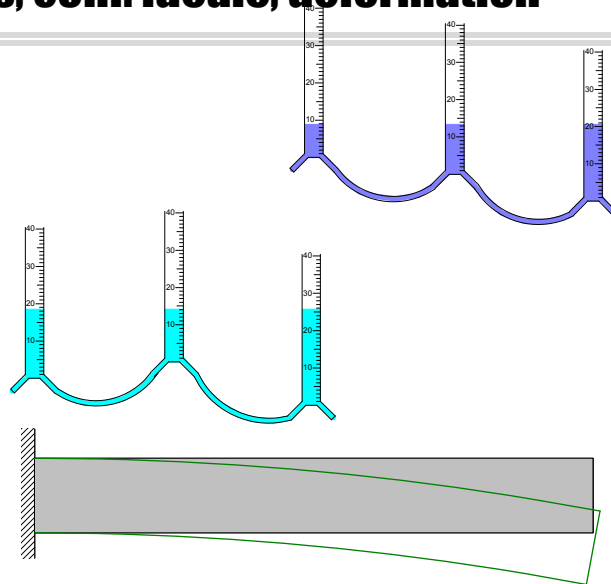


IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Deux circuits, conf. idéale, déformation

EPFL

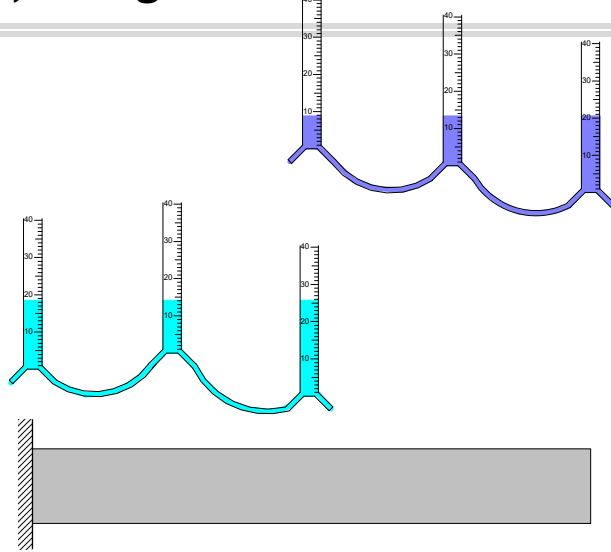


IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Deux circuits, configuration réelle

EPFL

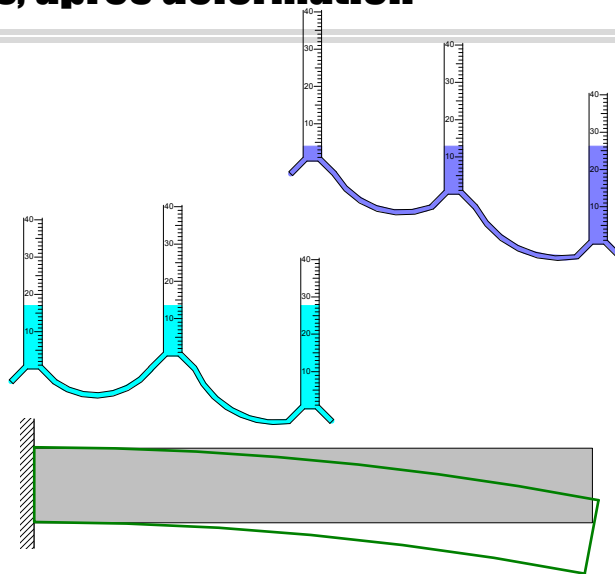


IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Deux circuits, après déformation

EPFL



IBETON – Laboratoire de construction en béton

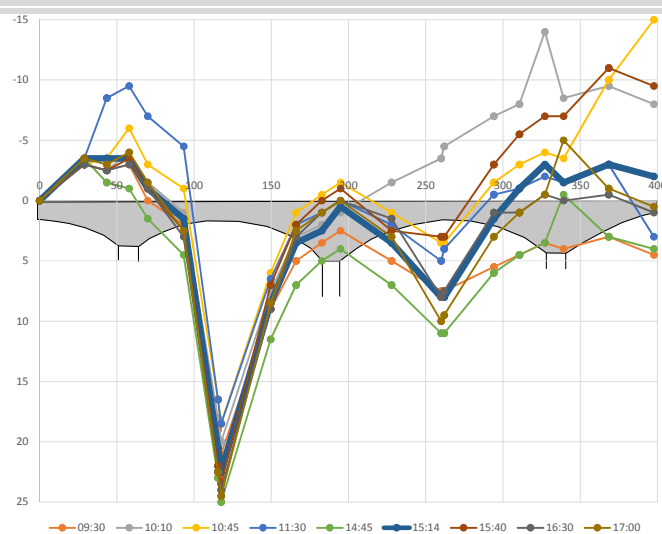
Mesures de Structures

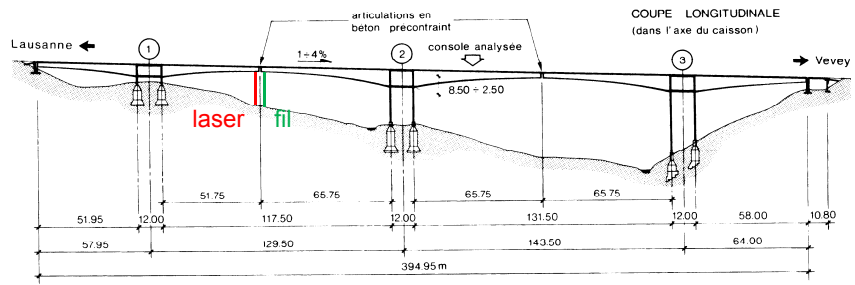
Dépouillement des mesures hydrostatiques

- Tableau Excel
- Implémenter le raisonnement développé ci-dessus et vérifier que le raisonnement fonctionne
- Graphique type « Nuage de points »
- Préparer un fichier Excel pour le dépouillement de l'ensemble du pont
- Démontrer que le fichier est valide en reproduisant le graphique de la page suivante
- Construire un graphique « Nuage de points » montrant le déplacement dans le temps

Mesures en 2013

(voir données dans fichier Lutrive2013.xls)

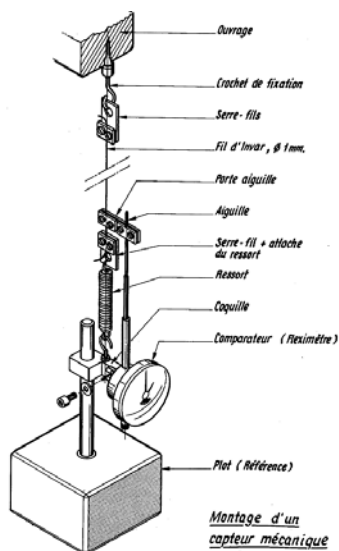




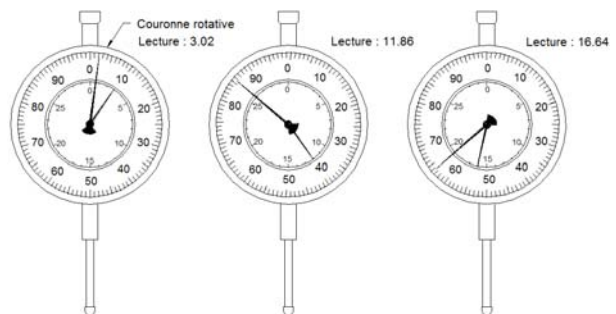
Dépouillement du comparateur mécanique et du distomètre à laser

Distance entre le pont et le sol

Comparateur mécanique



Montage d'un capteur mécanique



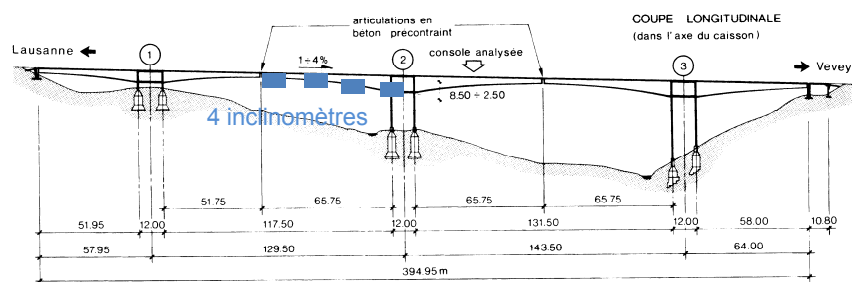
Dépouillement des mesures par comparateur et laser

- Tableau Excel
- Saisir l'heure, la température et la valeur mesurée
- Comprendre la signification des mesures
- Construire un graphique « Nuage de points » (x-y) montrant le déplacement dans le temps NE PAS UTILISER LA FONCTION « lisser » de votre logiciel

IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

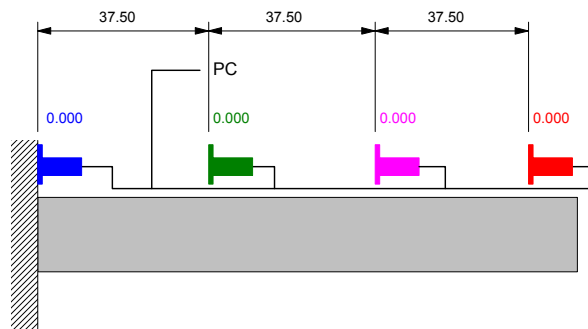
EPFL



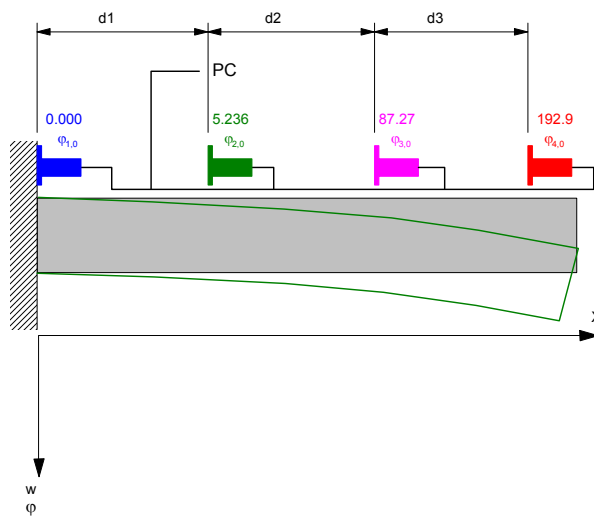
Dépouillement des mesures des inclinomètres

Comment déterminer la flèche sur la base des rotations ?

Mesure initiale

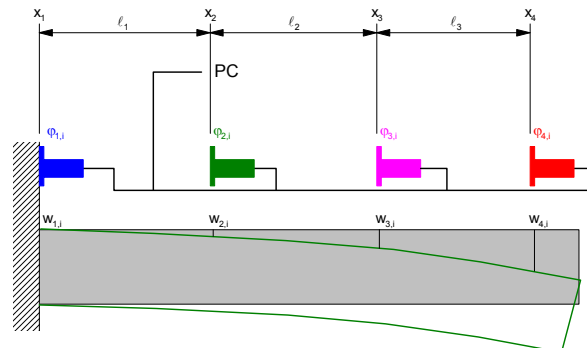


Mesure après déformation



Calcul de la courbe déformée pour la mesure i

EPFL



$\varphi_{j,i}$: rotation mesurée au point j à la mesure i

$\varphi_{j,0}$: rotation mesurée au point j à la mesure de référence (zéro)

$\Delta\varphi_{j,i} = \varphi_{j,i} - \varphi_{j,0}$: rotation mesurée au point j à la mesure i depuis la mise à zéro

$w_{j,i}$: flèche au point j à la mesure i

IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Calcul de la courbe déformée pour la mesure i (2)

EPFL

- Si la courbe $\Delta\varphi_1(x)$ est un polynôme de degré $n-1$ en x (où n est le nombre d'inclinomètres)
- Alors, la courbe $w_1(x)$ est un polynôme de degré n en x , qui est l'intégrale de $\Delta\varphi_1(x)$
- Pour $n = 4$, par exemple :
$$\Delta\varphi_1(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$
$$w_1(x) = a'x^4 + b'x^3 + c'x^2 + d'x + e'$$

IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Paramètres et inconnues; Equations

EPFL

▪ Que connaît-on ? Quelles sont les inconnues ?

- Paramètres
- Inconnues

Comment résoudre un système d'équations linéaires ? EPFL

$$a_1x_1 + b_1x_2 + c_1x_3 = d_1$$

$$a_2x_1 + b_2x_2 + c_2x_3 = d_2$$

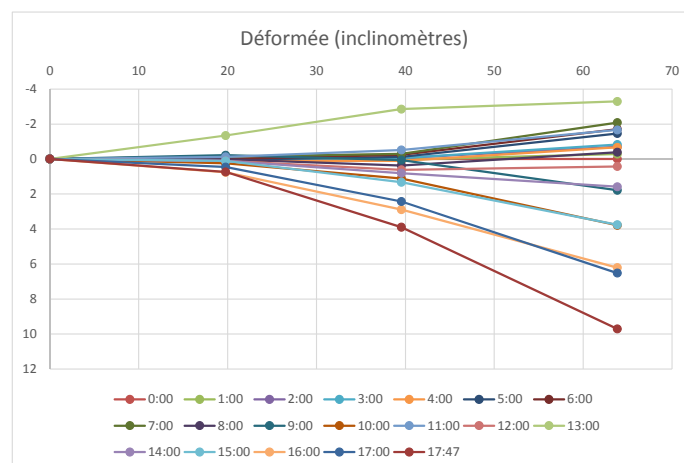
$$a_3x_1 + b_3x_2 + c_3x_3 = d_3$$

- Règle de Cramer
Voir l'article sur Wikipedia et la référence sur le site Moodle de la semaine

Dépouillement des mesures par inclinomètres

- Tableau Excel
- Implémenter le raisonnement développé ci-dessus et vérifier que le raisonnement fonctionne
- Préparer un fichier Excel pour le dépouillement de l'ensemble des mesures
- Pour chaque série de mesure (ligne), calculer la position du pont

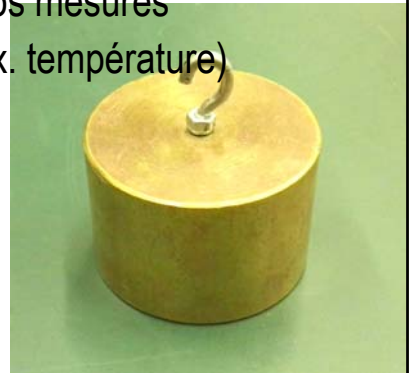
Mesures en 2013



Ce qu'il ne faut pas oublier de faire

EPFL

- Documenter les systèmes utilisés : croquis, photos
- Vérifier que les photos sont bonnes : on ne reviendra pas !
- Déterminer la position des points de mesure (sauf pots hydrostatiques)
- Mesurer tout ce qui peut avoir une influence sur vos mesures
- PARTAGER les résultats avec vos collègues (p. ex. température)
- Escape game : tout peut être utile !



IBETON – Laboratoire de construction en béton

Ce que doit contenir le rapport

EPFL

Fichier PowerPoint + Excel, etc.

- Description du pont
- Dispositifs de mesure utilisés
- Procédure de mesure
- Procédure de dépouillement
- Résultats (graphiques)
- Comparaison des diverses méthodes
- Leçons apprises

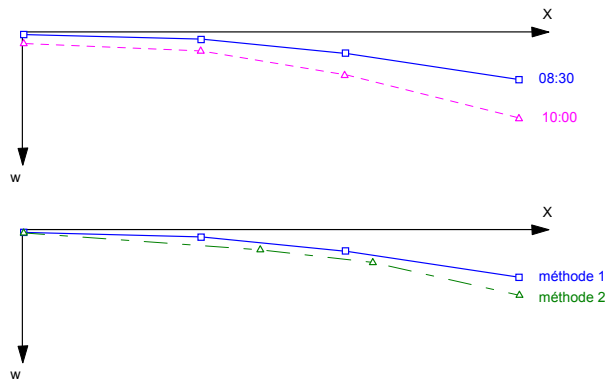
IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Les deux types de graphiques à préparer

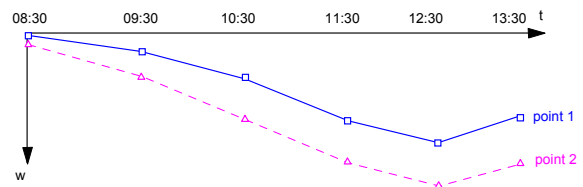
EPFL

Déformée de la structure
(déplacement w le long de l'axe x)



Pots hydrostatiques
Inclinomètres

Mouvement w d'un point au cours du temps t
(graphique temporel)



Aussi : évolution de la température au cours du temps t

Toutes les méthodes de mesure

IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Conclusion sur ce que vous avez appris

EPFL

- Comparaison et interprétation des résultats
 - Comportement du pont
- Comparaison et complémentarité
 - Méthodes de mesure
- Comportement et complémentarité
 - Plan humain

IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Journée de terrain : lundi 29 avril 2019

EPFL

- Rendez-vous à 08h00 précises au nord des halles de structure GC (en face de l'arrêt de bus / métro EPFL, au pied de la passerelle côté Est)
- Bonnes chaussures, habits chauds, **lampe de poche**
- Snacks pour les pauses
- Appareil de photo (mieux que téléphone)
- Ordinateurs bienvenus (courant électrique) PAS DE WIFI !!!
- Retour à l'EPFL aux alentours de 18h



IBETON – Laboratoire de construction en béton

Sécurité

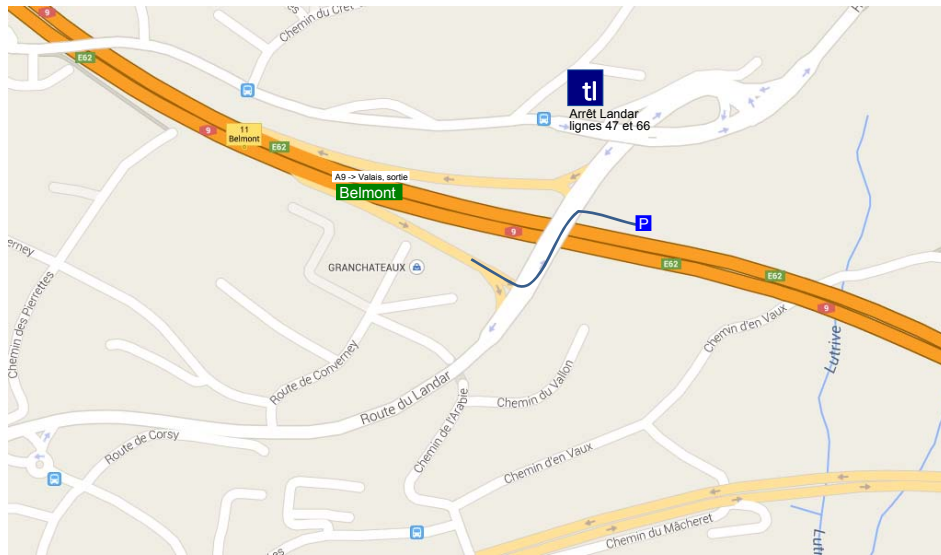
EPFL

- La sécurité, c'est un état d'esprit ! C'est VOUS !
- Regardez où vous mettez vos pieds, doigts, tête...!
- Attention sur les échelles (max. 1 personne !)
- Bonnes chaussures
- Port du casque obligatoire
- Habits chauds

IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures

Accès aux ponts sur la Lutrive



IBETON – Laboratoire de construction en béton

Mesures de Structures