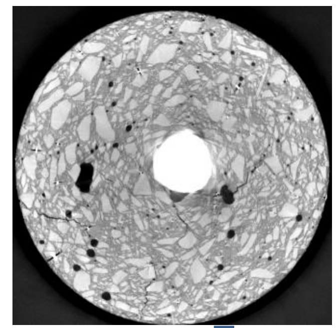
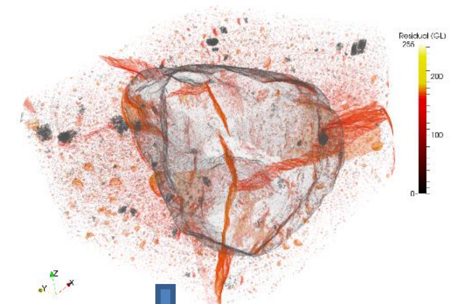
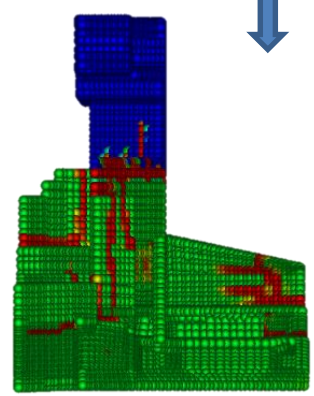
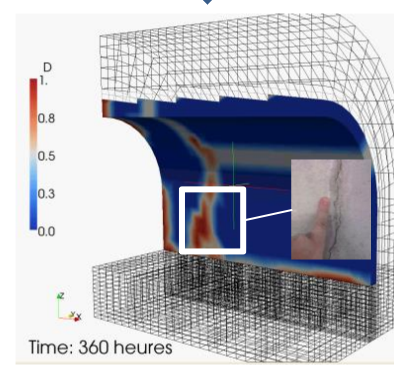
METHODES EXPERIMENTALES









Farid BENBOUDJEMA

https://www.researchgate.net/profile/Farid_Benboudjema

farid.benboudjema@ens-paris-saclay.fr

Plan - Introduction aux méthodes expérimentales

Introduction

1 - POURQUOI FAIT-ON DES MESURES EN GENIE CIVIL ?

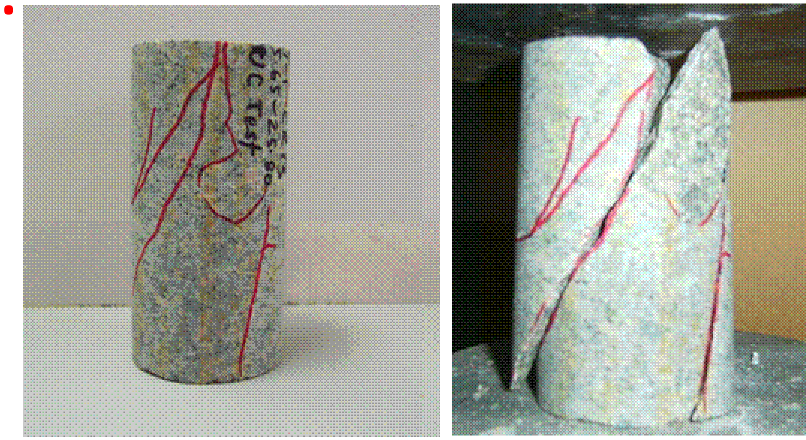
1. Stage, thèse, ingénieur recherche …

Essai sur éprouvette :
caractériser/identifier le comportement mécanique d'un matériau :

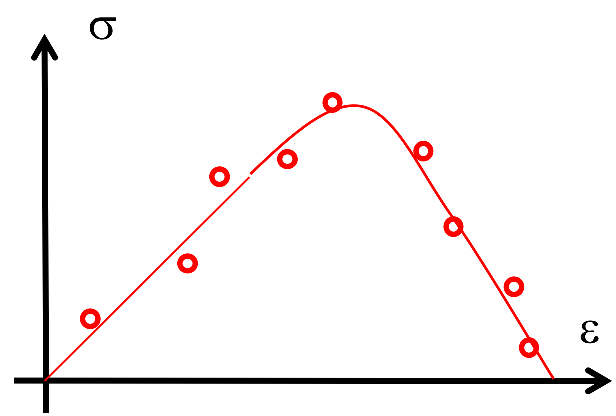
- E, ν, f_c, f_t, critère en élasticité/rupture
- Faciès de fissuration
- …

(a) Presse (b) Extensomètre à béton

Essai de compression sur béton



Essai de compression sur de la roche



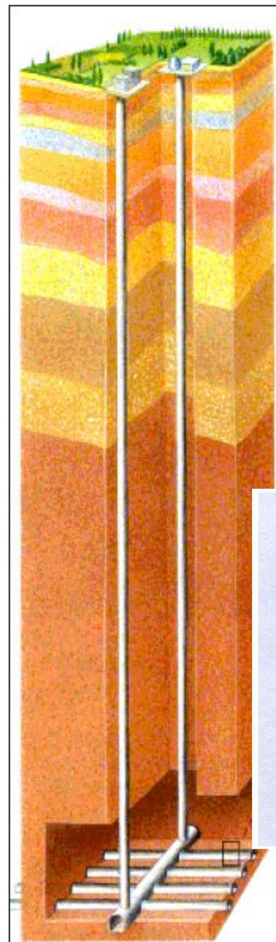
Prédire le comportement de structures

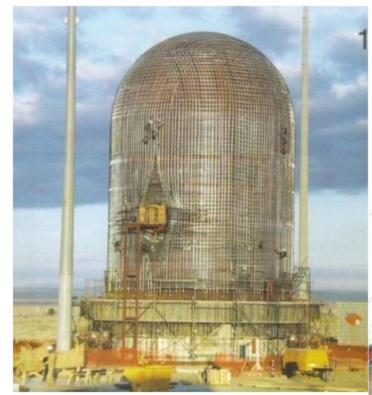
Introduction

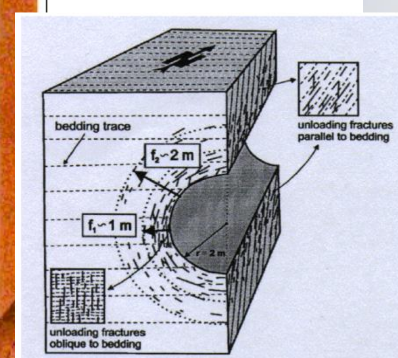
1 - POURQUOI FAIT-ON DES MESURES EN GENIE CIVIL ?

1. Stage, thèse, ingénieur recherche …

Essai sur structure : instrumentations (Température, accéléromètre, déformation, etc.)







- Valider des modèles de comportement
- Valider une stratégie de calcul (multi-échelles : réduction de modèle, conditions aux limites)
- Déterminer la durée de vie de structures et prolongation

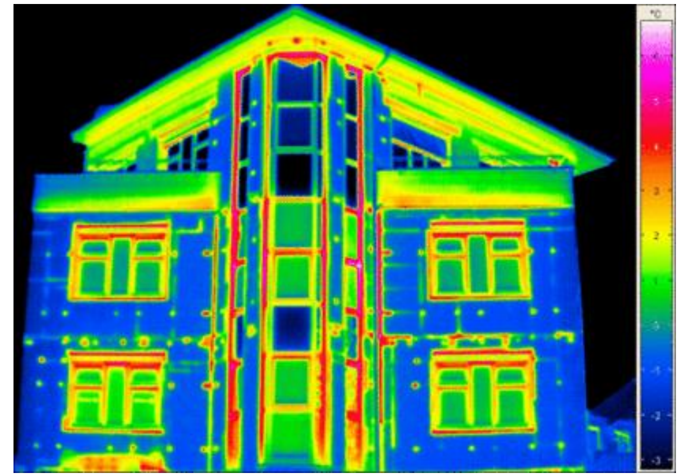
Introduction

1 - POURQUOI FAIT-ON DES MESURES EN GENIE CIVIL ?

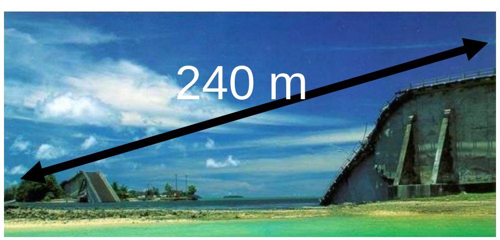
2. Contrôle sur chantier, sur ouvrage

Etalement, Affaissement au cône

Ponts thermiques

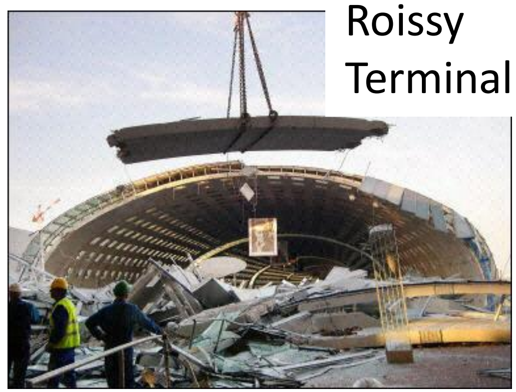


3. Monitoring d'ouvrages sensibles



Koro-Babeldaob Palau

Roissy Terminal 2E

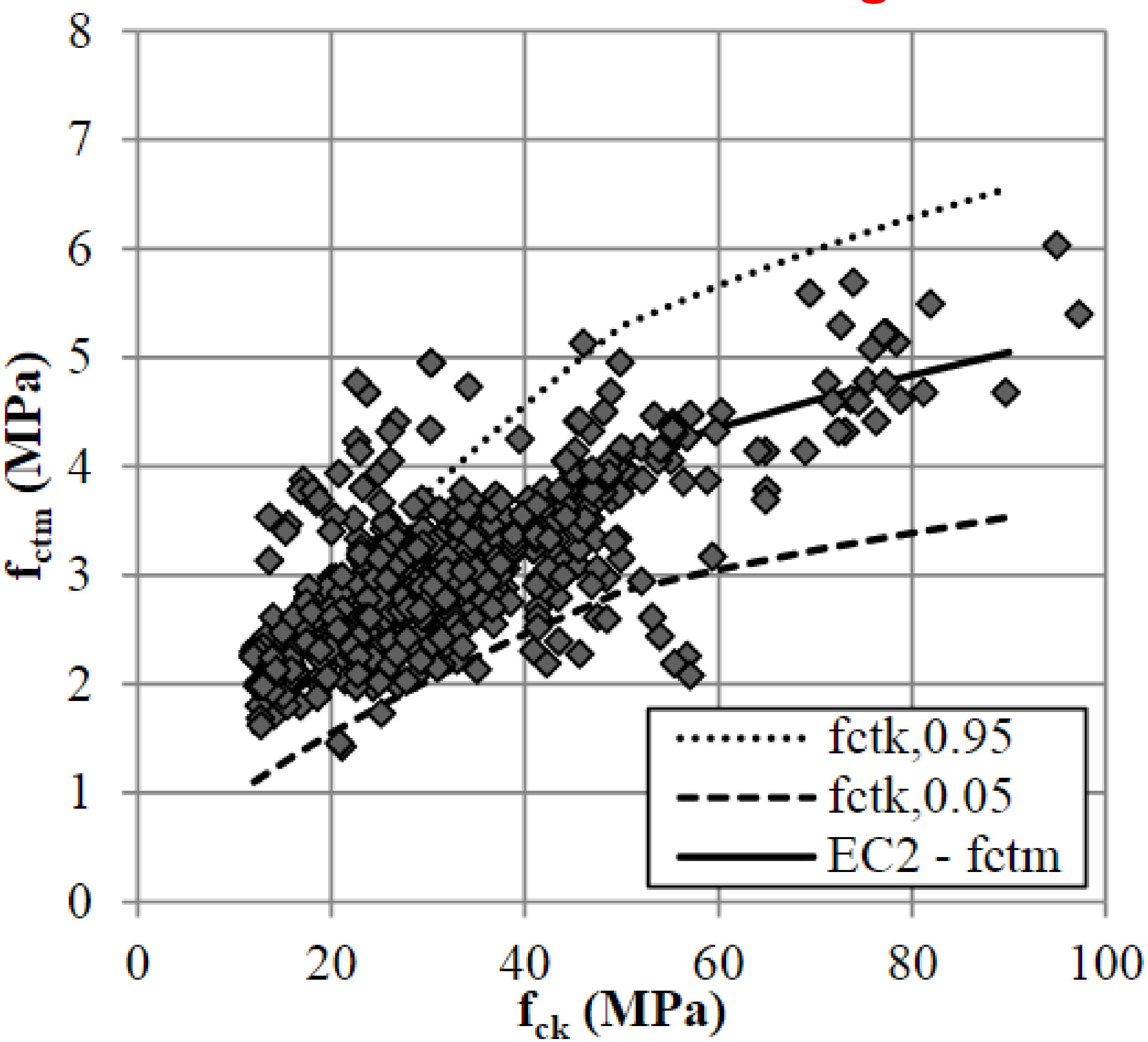


Réparations, réhabilitation, évacuation etc.

Introduction

1 - POURQUOI FAIT-ON DES MESURES EN GENIE CIVIL ?

4. Validité des codes de calcul réglementaire, évolution



EC2

$f_{ctm}=0,30\times f_{ck}^{(2/3)}$ ≤ C50/60

$f_{ctm}=2,12\cdot\ \ln(1+(f_{cm}/10))$ > C50/60

$f_{ctk,0,05} = 0,7\times f_{ctm}$

fractile 5%

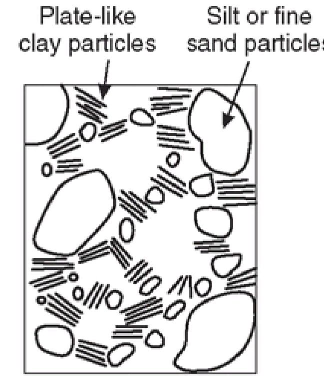
$f_{ctk,0,95} = 1,3\times f_{ctm}$

fractile 95%

Plan - Introduction aux méthodes expérimentales

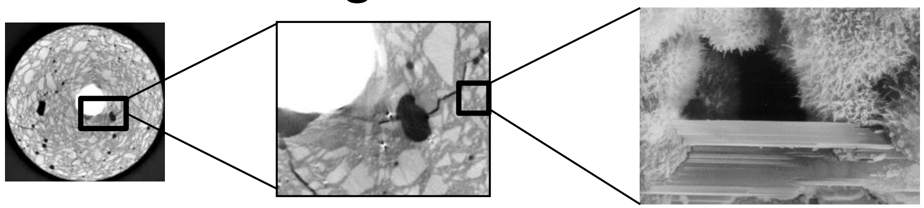
1. Pourquoi fait-on des mesures ?
2. **<u>Spécificité du Génie Civil</u>**
3. Que faire de la mesure ?
4. Exemple d'essais expérimentaux
5. Un peu de probabilité
6. Erreurs en métrologie
7. Quelques réflexions

2. Spécificité du Génie Civil



(a) “Normal” Clay

- <u>Aspect Multi-Physique et durabilité:</u>
  - Matériaux hétérogènes à différentes échelles



  - Matériaux évolutifs (jeune âge, vieillissement)
  - Environnement « agressif » (érosion, corrosion des aciers, lixiviation du béton, UV sur bois, pathologies, présence de sulfate dans les sols, de polluants …)
  - Durabilité exigée (garantie décennale ➔ 50 ans minimum ➔ > 100 ans fréquemment et plus pour le stockage de déchets radioactifs (HA/VL → 2 millions d’années)

Argile de Bure
pH = 7 & [Ca^{2+}] = 1,89 mmol/L

Béton (stockage de déchets radioactifs)
pH = 13 & [Ca^{2+}] = 15 mmol/L

Réflexion sur la <u>résistance électrochimique</u> du capteur, la <u>durabilité de la mesure (REX)</u>, le <u>t_0 de la mesure</u>, le besoin de mesures <u>THMC</u> <u>et environnementales</u>

Plan - Introduction aux méthodes expérimentales

1. Pourquoi fait-on des mesures ?
2. Spécificité du Génie Civil
3. **Que faire de la mesure ?**
4. Exemple d’essais expérimentaux
5. Un peu de probabilité
6. Erreurs en métrologie
7. Quelques réflexions

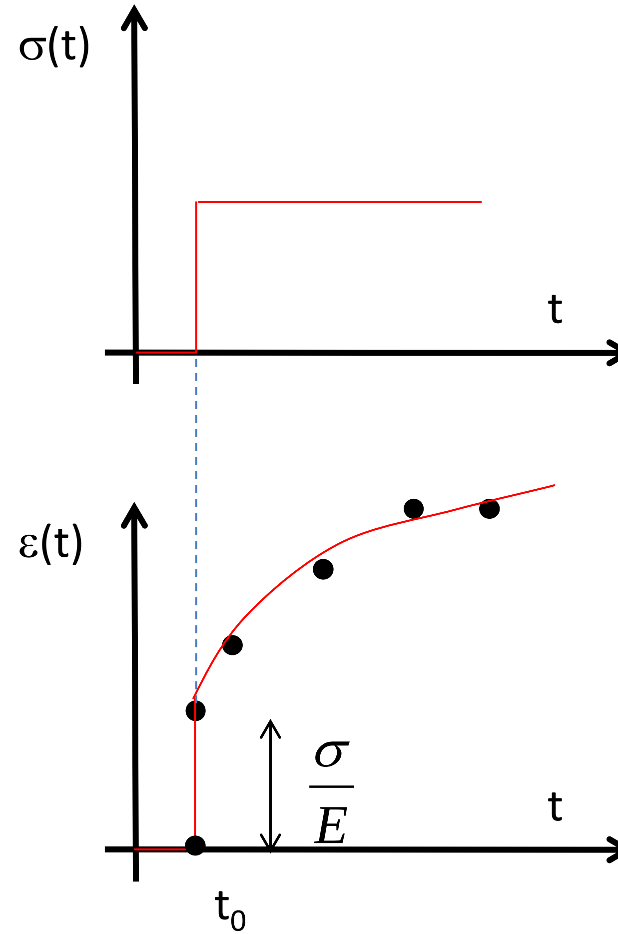
3. Que faire de la mesure ?

Identifier les paramètres d'une loi de comportement

Ex : Recherche des paramètres d'une loi de fluage

(a) Presse

(b) Extensomètre à béton



$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} + J \cdot \sigma \cdot \ln\left[\left(\frac{t}{t_0}\right)^n\right]$$

Recherche des meilleurs paramètres
E, J, n

Prédire le comportement de structures

3. Que faire de la mesure ?

Méthodes des moindres carrés :

Considérons une fonction erreur, qui déterminera l'écart entre les résultats expérimentaux et les résultats issus du modèle. Si la fonction erreur est faible, cela traduit que les paramètres du modèle de fluage permettent une bonne approximation des résultats expérimentaux. La fonction erreur la plus utilisée est la fonction « chi-deux », χ^2 :

$$\chi^2(\vec{a}) = f(\vec{a}) = \frac{1}{s}\sum_{j=1}^{n}\Big(\underbrace{\varepsilon_j}_{\text{Valeurs expérimentales}} - \underbrace{\varepsilon(\vec{a},t_j)}_{\text{Valeurs calculées}}\Big)^2 \qquad \vec{a} = \begin{bmatrix} E \\ J \\ n \end{bmatrix}$$

σ est l'écart-type standard :

$$s = \sqrt{\frac{n\sum_{j=1}^{n}\varepsilon_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n}\varepsilon_j\right)^2}{n\cdot(n-1)}}$$

➡ Résultat à normer, à pondérer ?

L'idée est donc de trouver le vecteur $\vec{a}$ qui minimise la fonction erreur

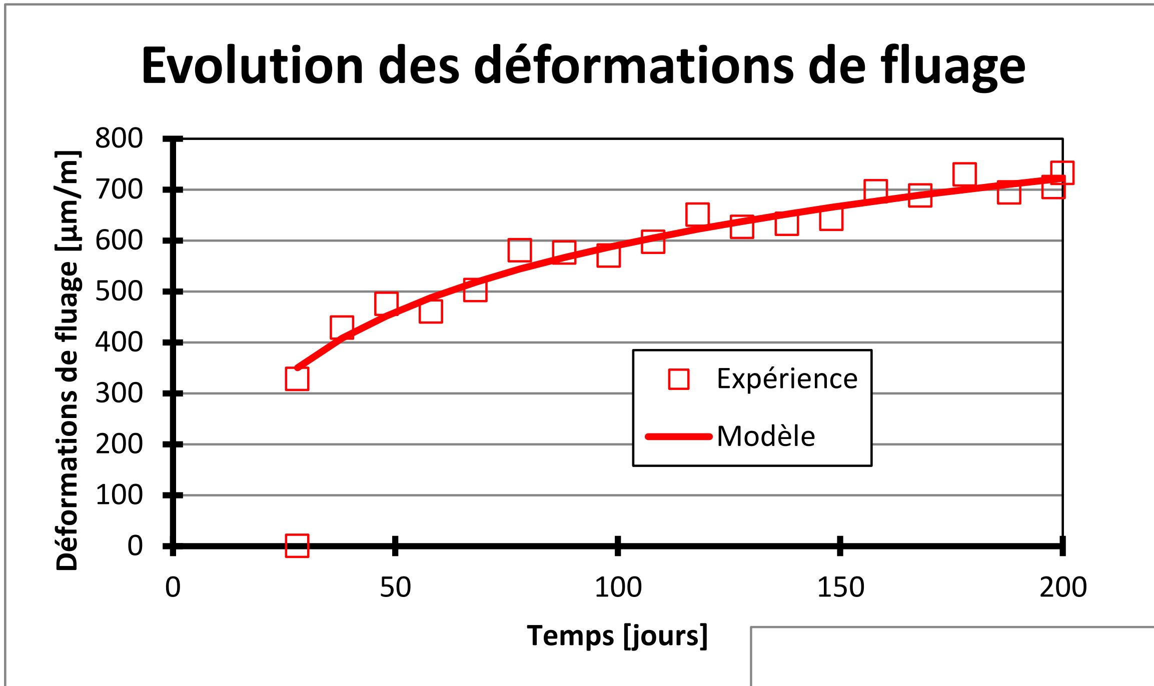
$\Rightarrow$ Méthode de Newton, Taylor, des gradients conjugués (Levenberg-Marquardt), basé sur le calcul de dérivées (analytiques ou numériques) : Excel, Matlab …

Problèmes : Minimum locaux,

Modèle numérique (éléments finis, différences finis)

➡ Réseaux de neurones artificiels (fonction inconnue) : Matlab
Finite Element Model Updating

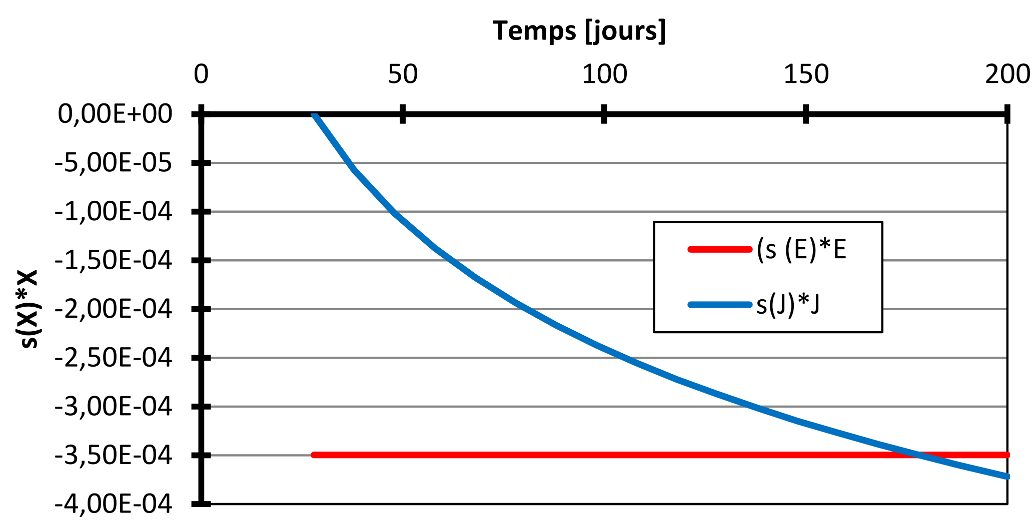
3. Que faire de la mesure ?



$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} + J \cdot \sigma \cdot \ln\left[\left(\frac{t}{t_0}\right)^n\right]$$

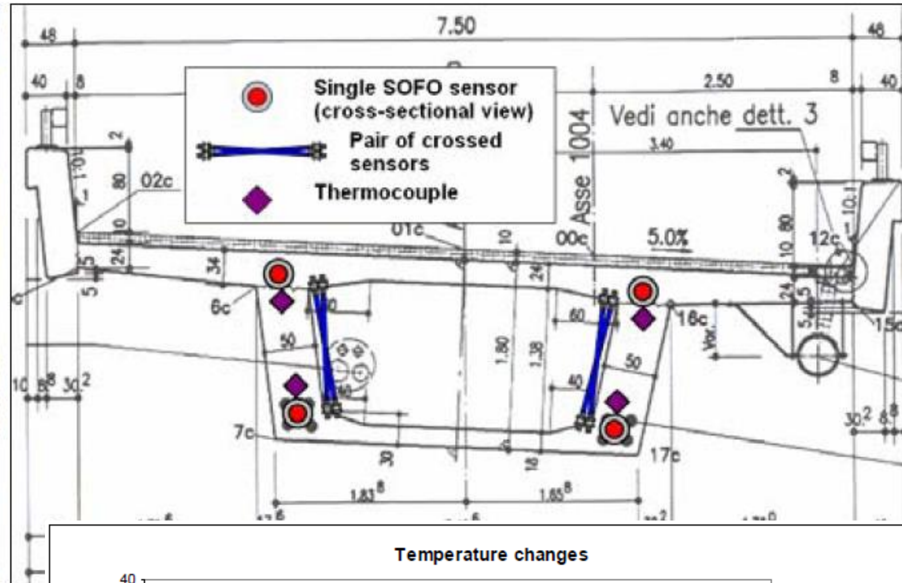
« Meilleure »
identification

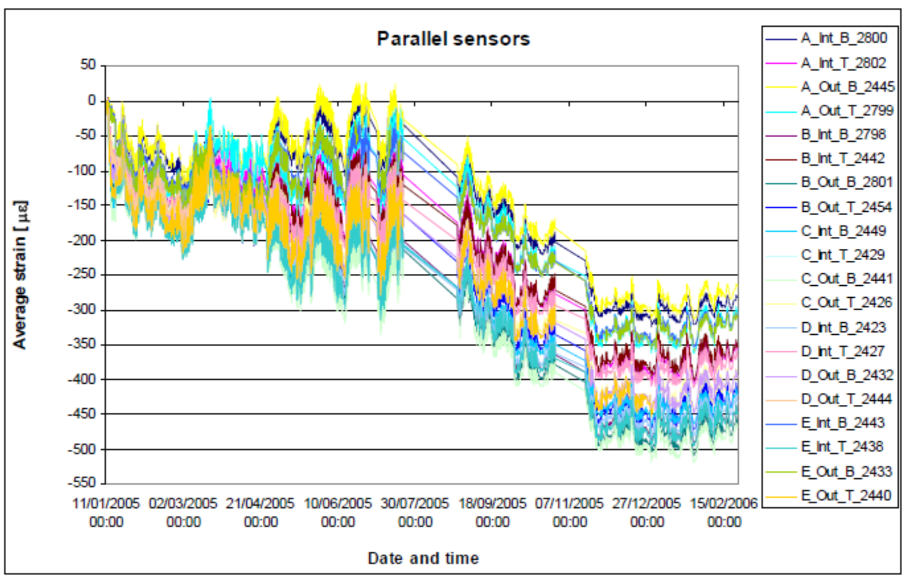
E	28,6	GPa
J	$1{,}88.10^{-2}$	Gpa^{-1}
n	1,99	

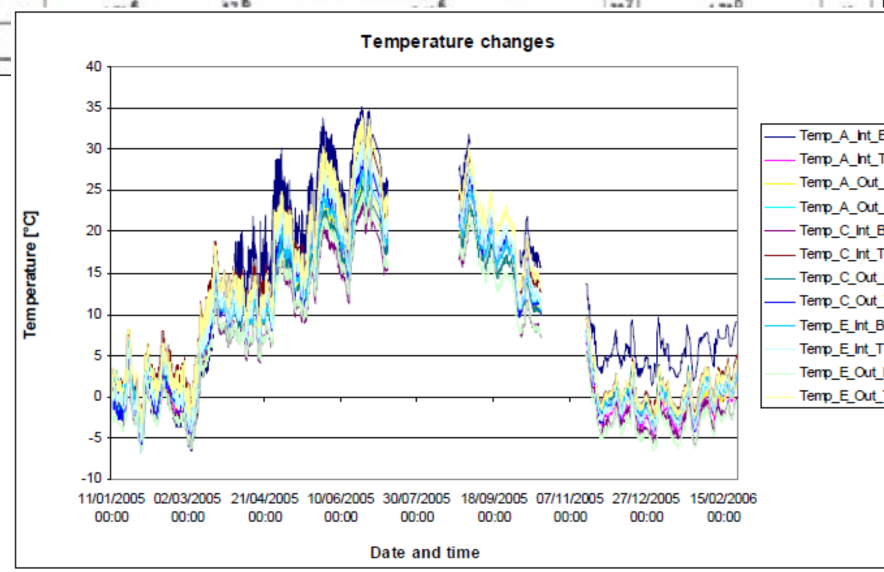


Evolution de la sensibilité (normée)

3. Que faire de la mesure ?







Qu'est-ce qu'on en fait ? Comment on interprète ? ➡ Risque de rupture ?

Où on instrumente ? ➡ Réanalyse par éléments finis ?

Plan - Introduction aux méthodes expérimentales

1. Pourquoi fait-on des mesures ?

2. Spécificité du Génie Civil

3. Que faire de la mesure ?

4. **Exemple d'essais expérimentaux**

5. Un peu de probabilité

6. Erreurs en métrologie

7. Quelques réflexions

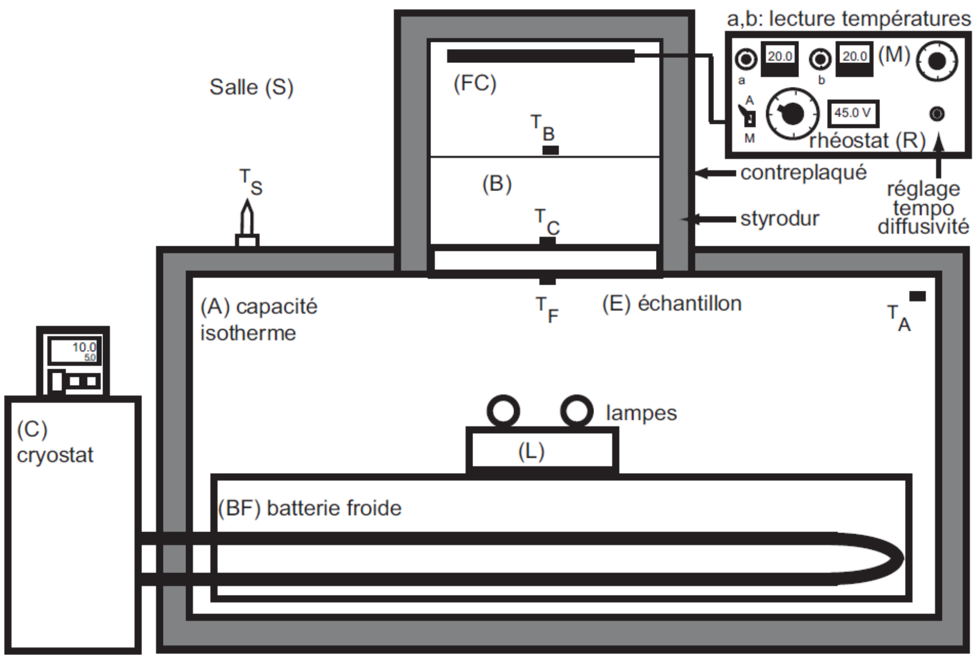
4. Exemple d'essais expérimentaux

Essai pour mesurer la conductivité thermique

Essai pour mesurer les propriétés élastiques et la résistance en compression d'un béton ou d'une roche

– commutateur a : lecture des températures dans la boîte supérieure (B)
  - 1 : température T_B interne à la boîte (B) ;
  - 2 : température T_C sur la face supérieure de l'échantillon (E) ;
  - 3 : température T_F sur la face inférieure de l'échantillon (E).

– commutateur b : lecture des autres températures
  - 1 : température T_A dans le volume (A) ;
  - 2 : température T_S dans la salle (S).



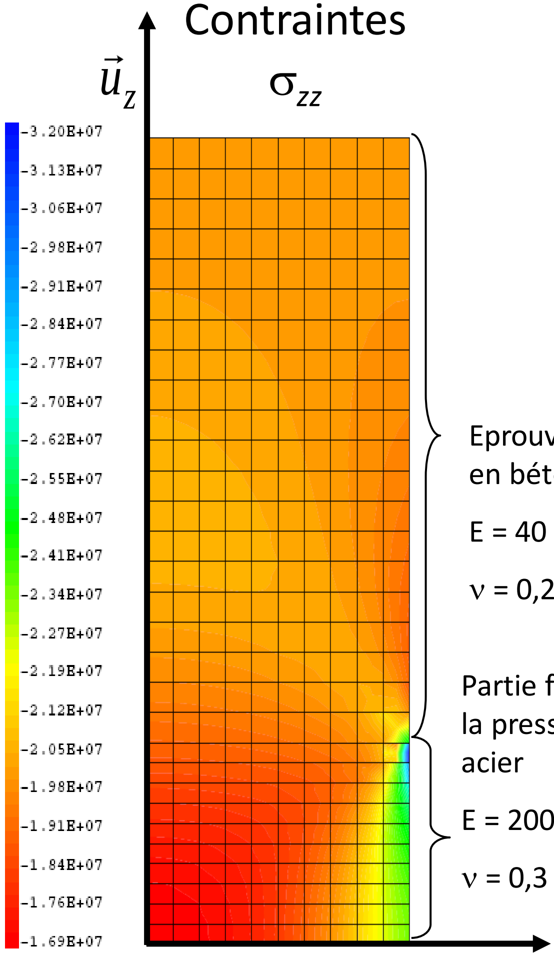
4. Exemple d'essais expérimentaux

COMPRESSION

Cas du béton

Calculs EF

Contraintes σ_{zz}



Eprouvette en béton

E = 40 GPa

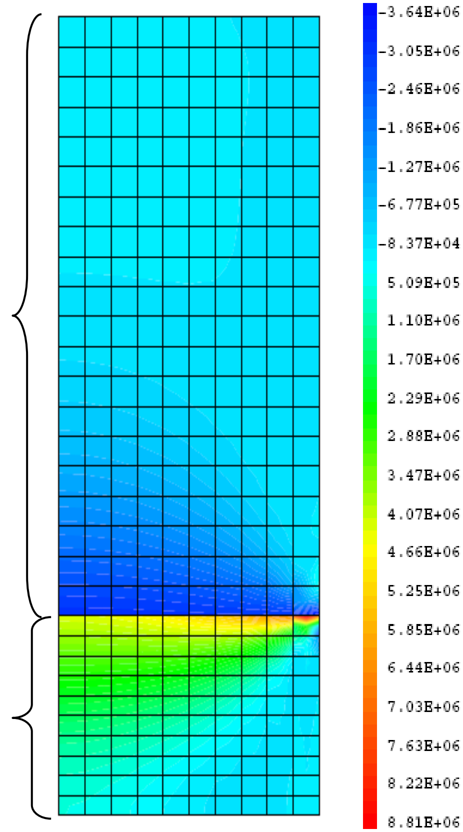
ν = 0,2

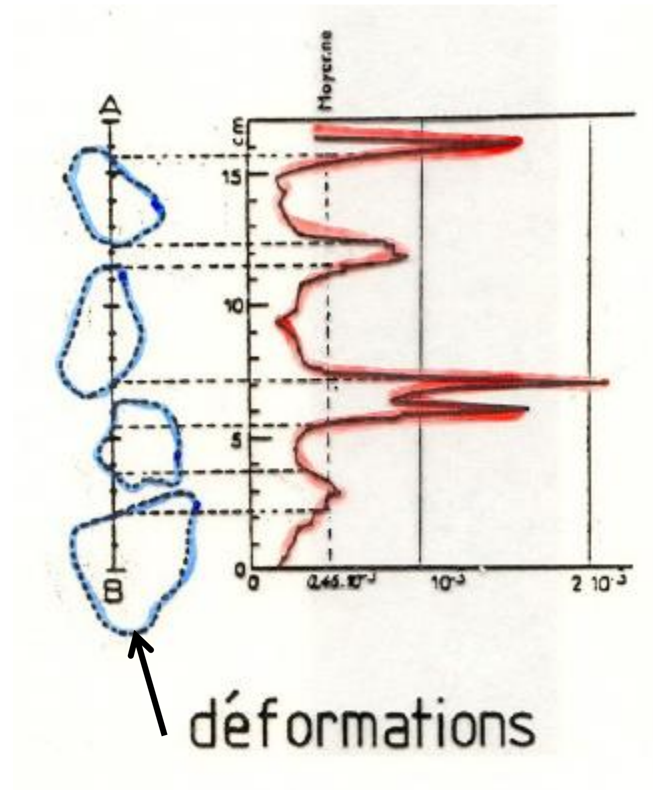
Partie fixe de la presse en acier

E = 200 GPa

ν = 0,3

Contraintes σ_{rr}



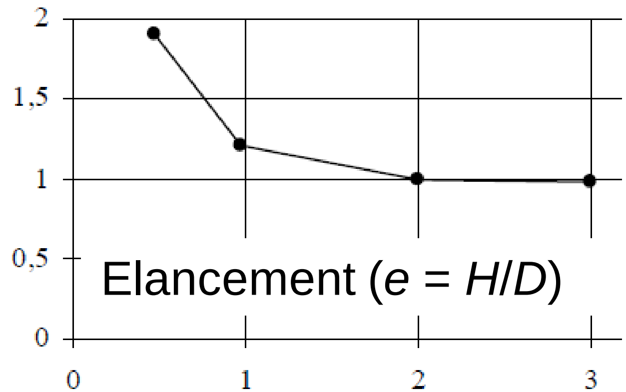


Granulat

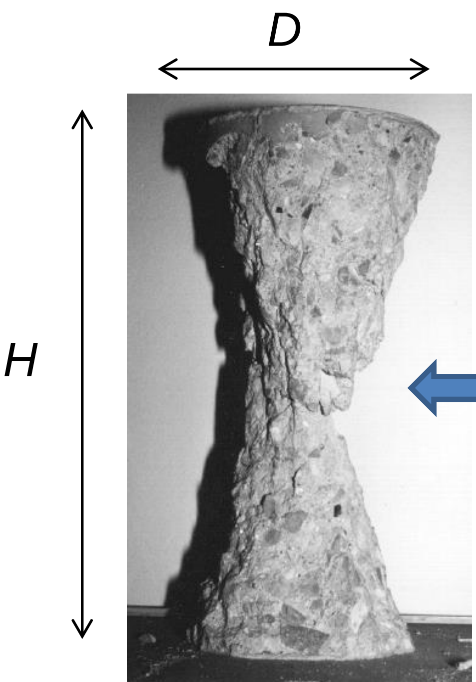
4. Exemple d'essais expérimentaux

COMPRESSION

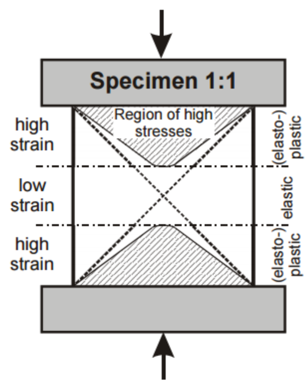
Résistance relative $f_c(e)/f_c(e=2)$

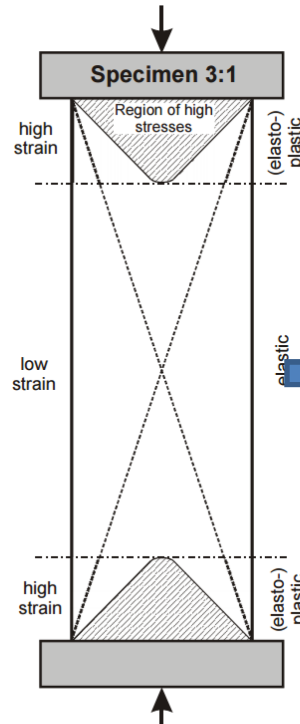


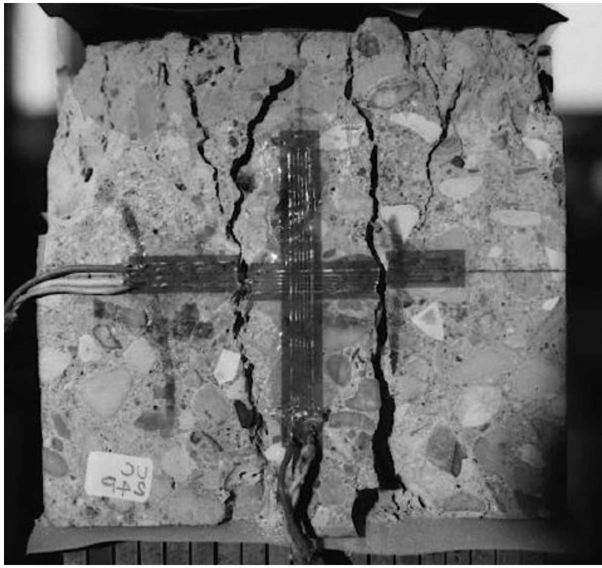
Cf. https://www.youtube.com/watch?v=tFGU1mhFHGc (IFSTTAR)



Rupture avec frettage



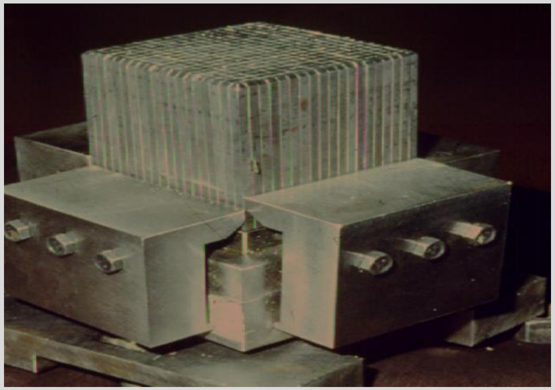




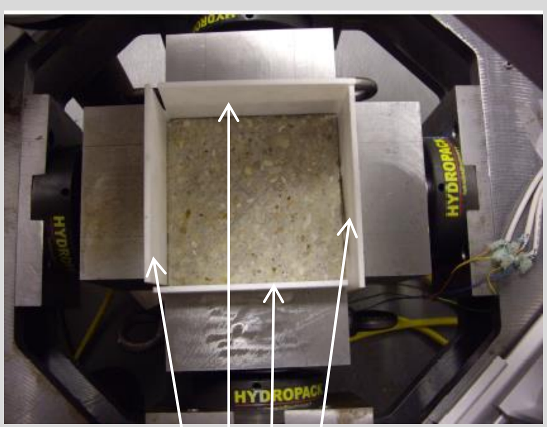
Rupture sans frettage

4. Exemple d'essais expérimentaux

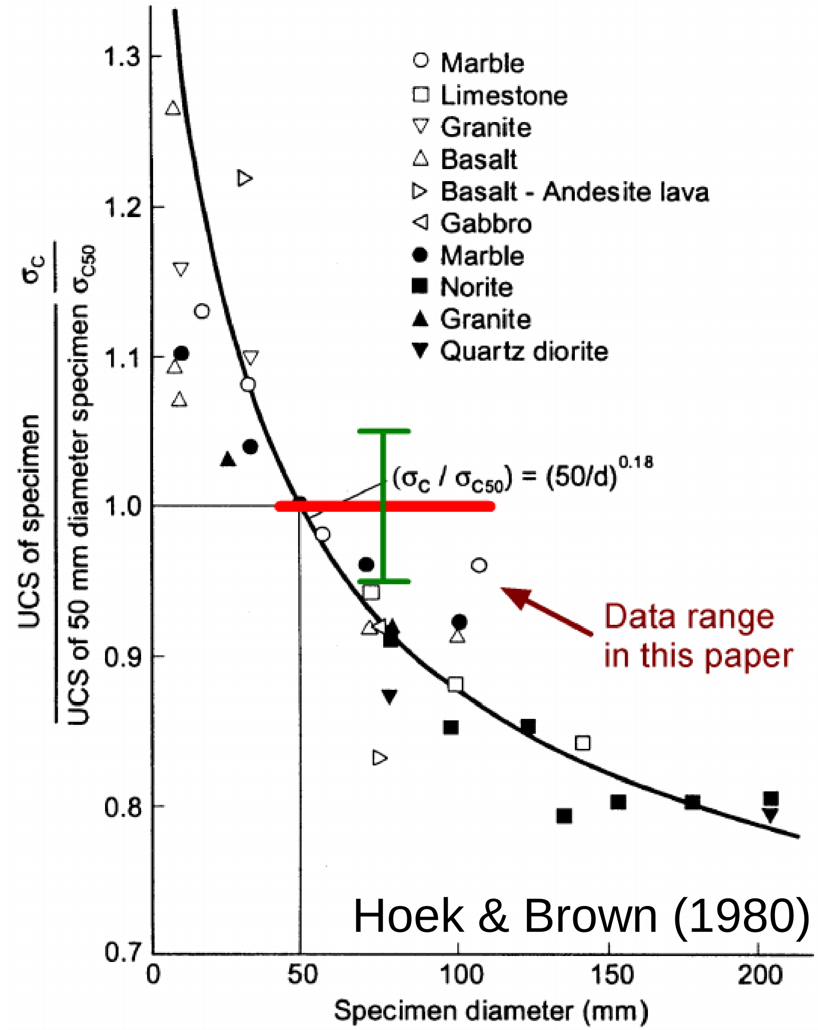
COMPRESSION



Peigne métallique



Teflon



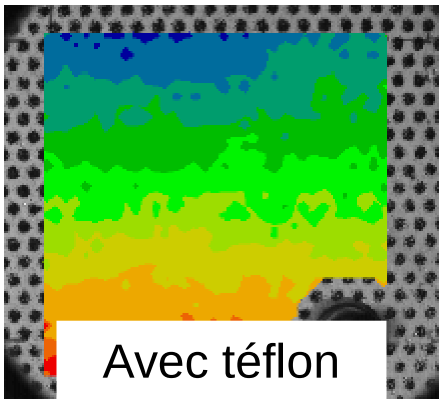
Size effect, UCS = Unconfined compressive strength

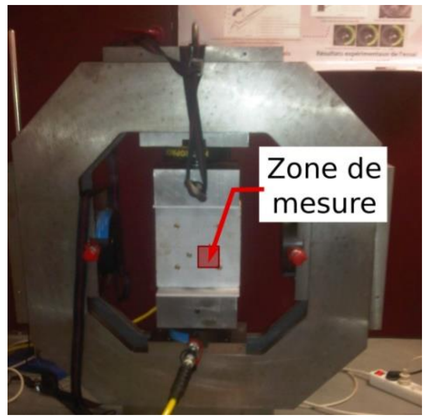
4. Exemple d'essais expérimentaux

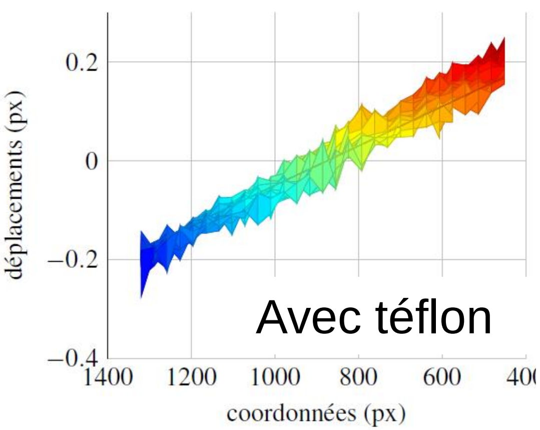
COMPRESSION

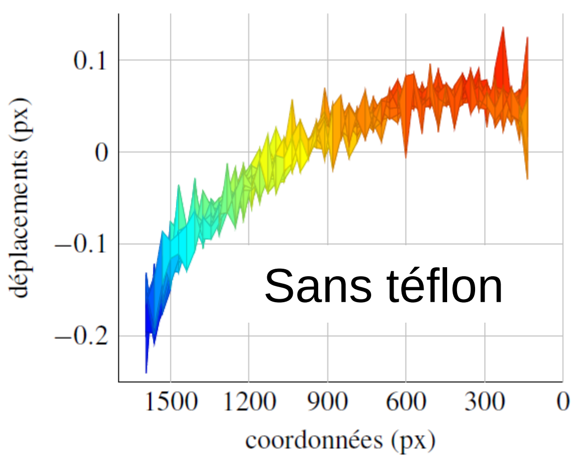
Essai 1D

Déplacement vertical (CIN)

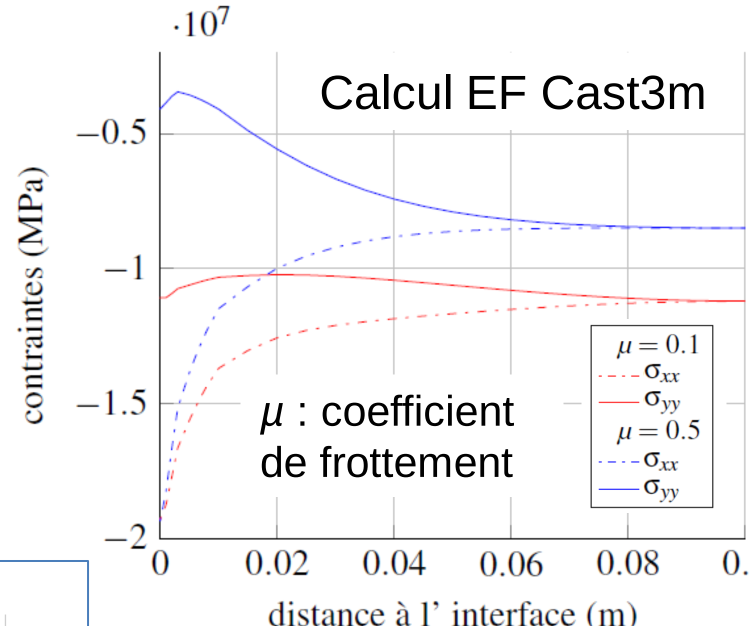




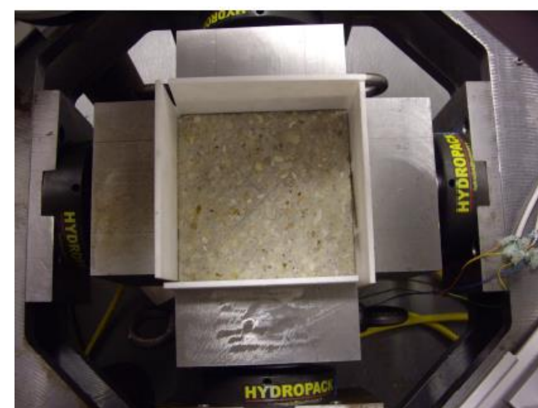




Essai 2D



Contraintes σ_{xx} et σ_{yy}

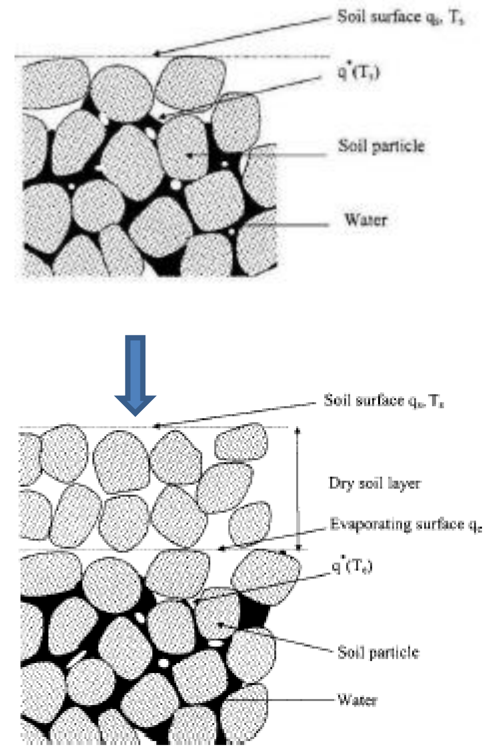


Thèse A. Hilaire

4. Exemple d'essais expérimentaux

- Effet de la succion capillaire

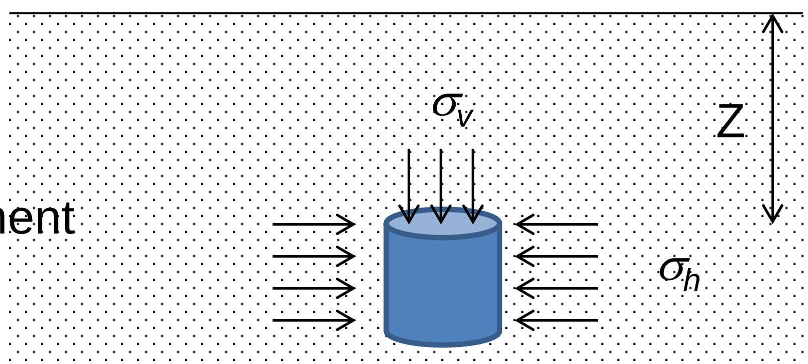
Fissuration à la surface de l'argile d'Héricourt non-traitée à la fin du séchage (Song 2014)



(Aluwihare et Watanabe 2003)

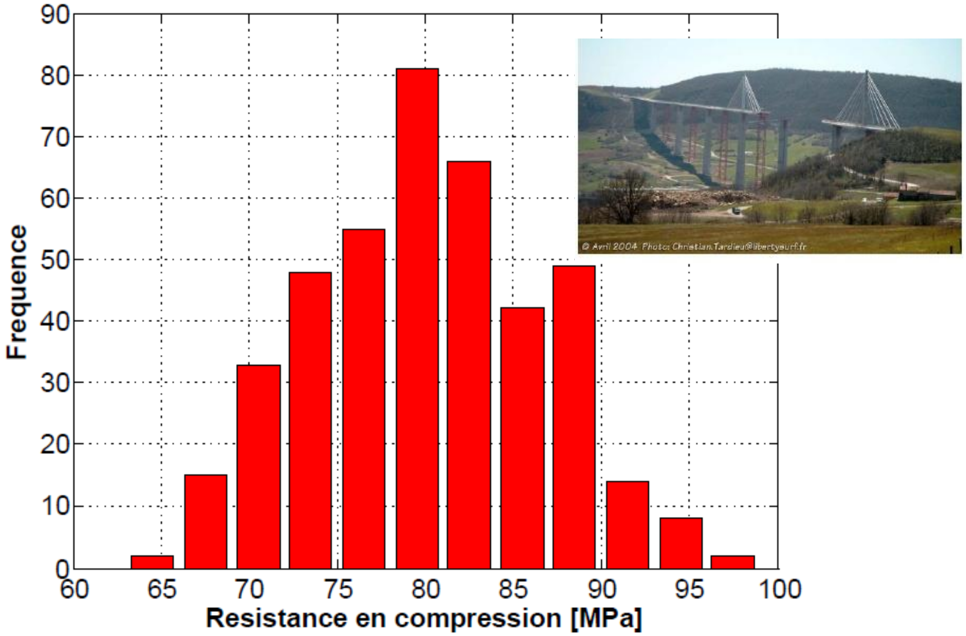
- Effet des contraintes initiales

Confinement



4. Exemple d'essais expérimentaux

Répartition des résistances mécaniques pour le BHP du viaduc de Millau (données Eiffage)

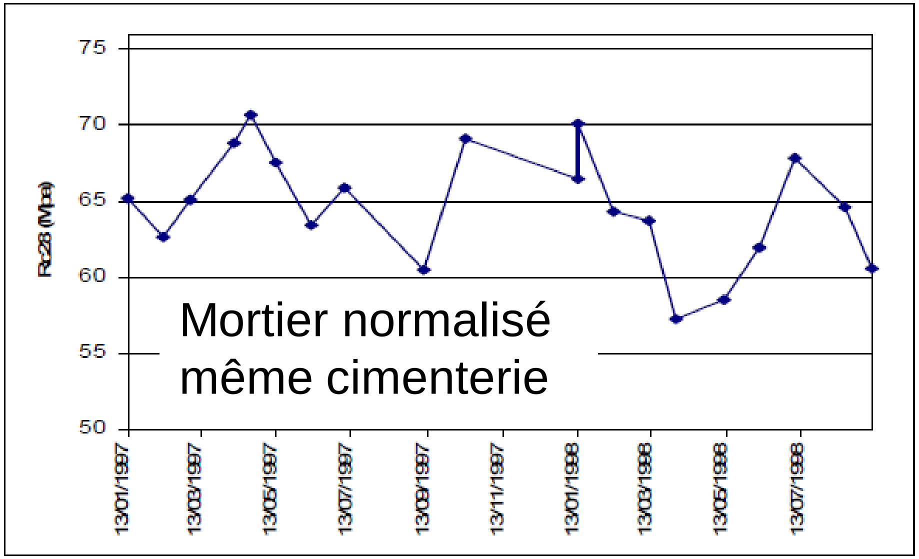


$f_{ck28} = f_{cm28} - 8$ *(MPa)*
Eurocode 2

Opérateur (soin, erreur, protocole)

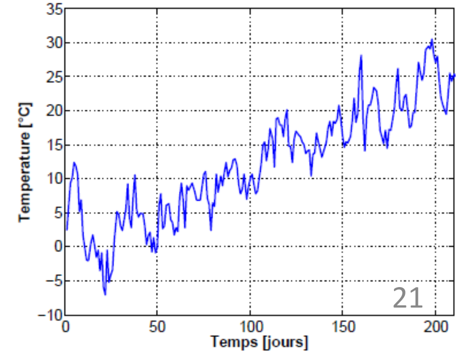
Incertitude de mesures

Lot de ciment, granulat (teneur en eau, fines …)



Hétérogénéité du matériau (VER)

Température, humidité relative



Plan - Introduction aux méthodes expérimentales

1. Pourquoi fait-on des mesures ?
2. Spécificité du Génie Civil
3. Que faire de la mesure ?
4. Exemple d'essais expérimentaux
5. **Un peu de probabilité**
6. Erreurs en métrologie
7. Quelques réflexions

5 Un peu de probabilité

Caractérisation de la variabilité

Il est important de savoir distinguer :

- la variabilité caractérisée par la moyenne des mesures effectuées et son écart-type (entre autre) ;
- l'incertitude-type A caractérisant **l'incertitude sur la moyenne des mesures effectuées**, autrement dit la confiance que l'on peut avoir sur la moyenne des résultats (*voir ci-après*) ;
- l'incertitude-type B composée obtenue à l'aide des données sur les **capteurs** utilisées qui caractérise l'incertitude sur le résultat obtenu pour **chaque éprouvette** (*voir ci-après*, § 6)

Source X. Jourdain

5 Un peu de probabilité

Caractérisation de la variabilité

Réalisation d'essai de compression pour déterminer la résistance en compression :

Éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Résistance [MPa]	30,6	38,2	33,4	36,5	34,2	37,5	35,2	29,5	37,7

Moyenne d'une population de *n* résultats expérimentaux (x_i étant assimilé à une variable aléatoire = résistance en compression ici) :

$$\bar{x} \doteq \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

5 Un peu de probabilité

Incertitude-type A (mesure sur une population) : u_a

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$$

L'hypothèse sous-jacente étant que la population étudiée n'est pas complète d'où le (n - 1) au dénominateur

n essais

$$u_a^2 = \frac{\sigma_a^2}{n} = \frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$$

La fonction Excel associée est dénommée "ECARTYPE.STANDARD"

Le coefficient de variation c_{va}

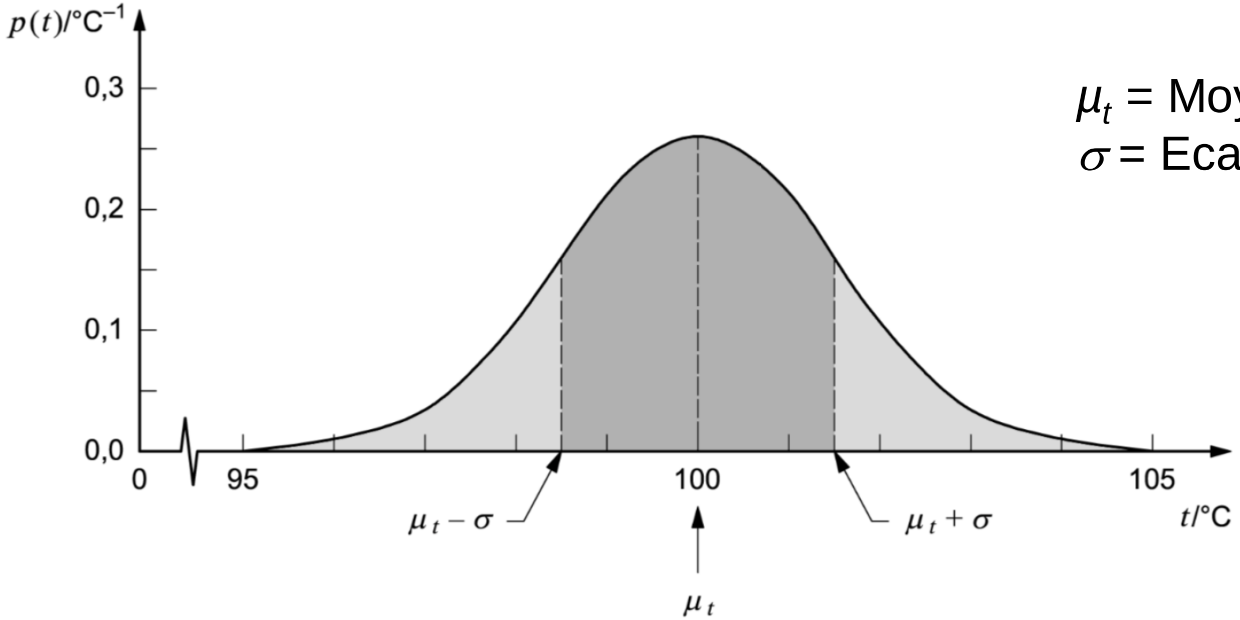
$$c_{va} = \frac{\sigma_a}{\bar{x}}$$

Source X. Jourdain

5 Un peu de probabilité

Loi normale

Pour une distribution suivant une loi normale, environ 68,2% de la population a une valeur comprise entre la moyenne plus ou moins un écart-type



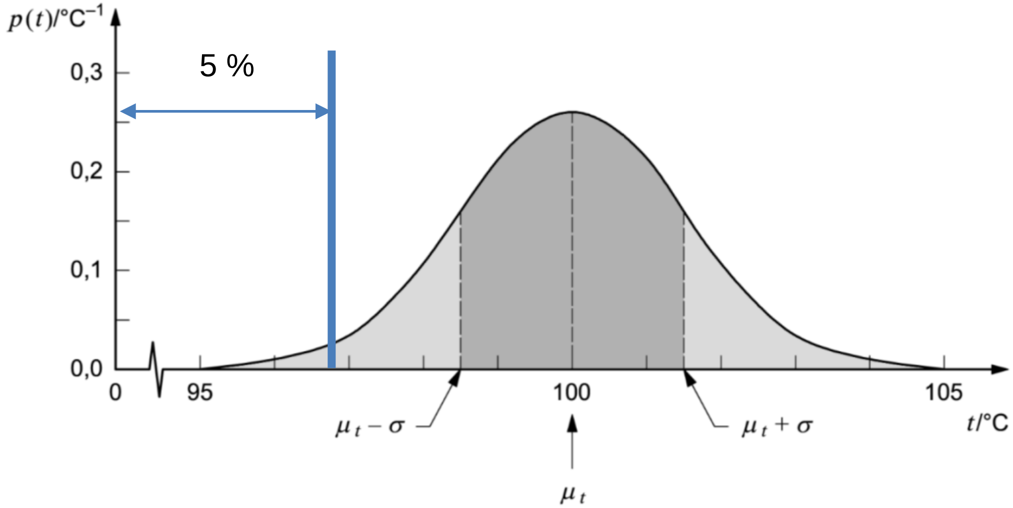
μ_t = Moyenne
σ = Ecart-type

écart à la moyenne	$\pm\,\sigma$	$\pm 1,645\sigma$	$\pm 1,96\sigma$	$\pm 2\sigma$
pourcentage de la population	68,2 %	90 %	95 %	95,4%

5 Un peu de probabilité

$f_{ck28} = f_{cm28} - 8$ *(MPa)*
Eurocode 2

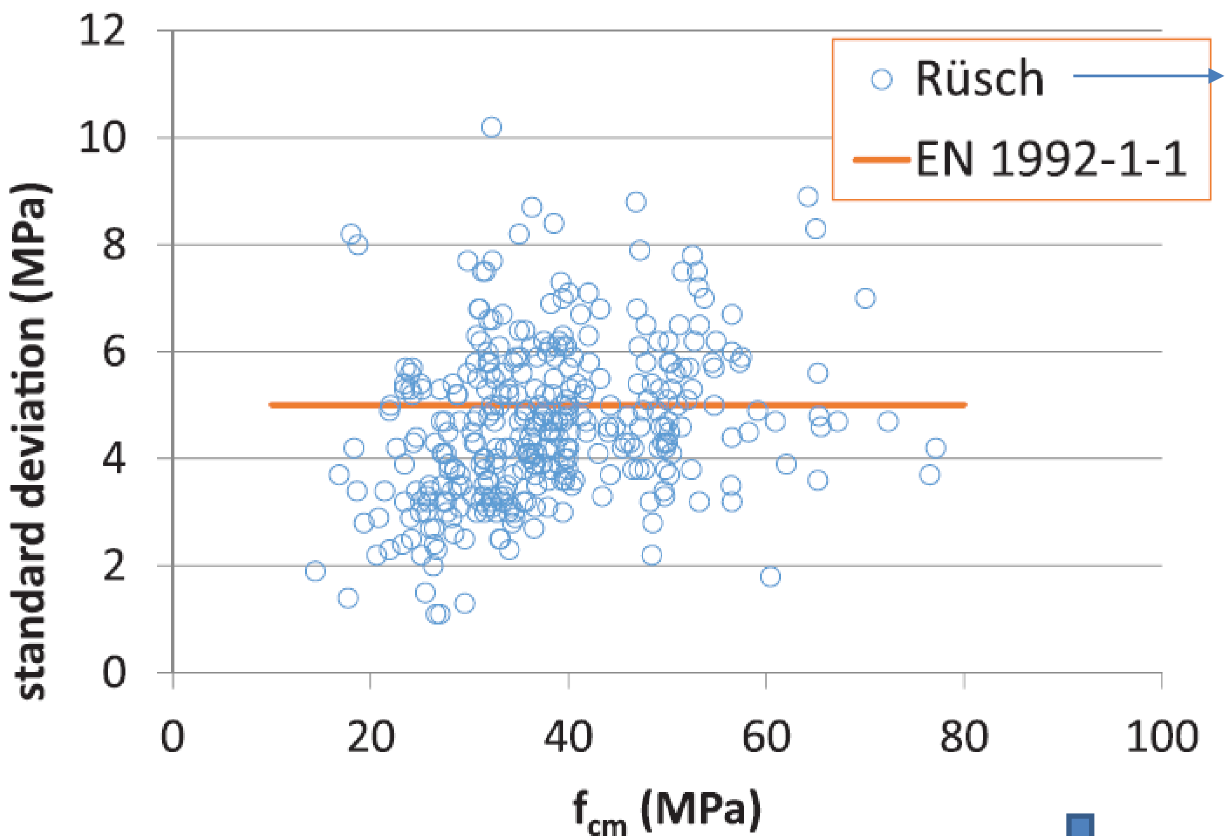
Tiré des travaux de Rüsh et al. (1969)



NB : Dans le cas de la détermination des résistances caractéristiques (Eurocodes, la résistance caractéristique est généralement définie par le fractile à 5 %. Dans ce cas, 95% des échantillons doivent avoir une résistance supérieure à la valeur fixée (Partie 4.2.(3) de l'Eurocode 0, partie 3.1.2.(1) pour la résistance du béton dans l'Eurocode 2,. Le calcul à faire est alors $f_{ck28} = f_{cm} - 1{,}645.\sigma$

Qu'en est-il des résultats expérimentaux ?

5 Un peu de probabilité



Rüsh et al. (1969)

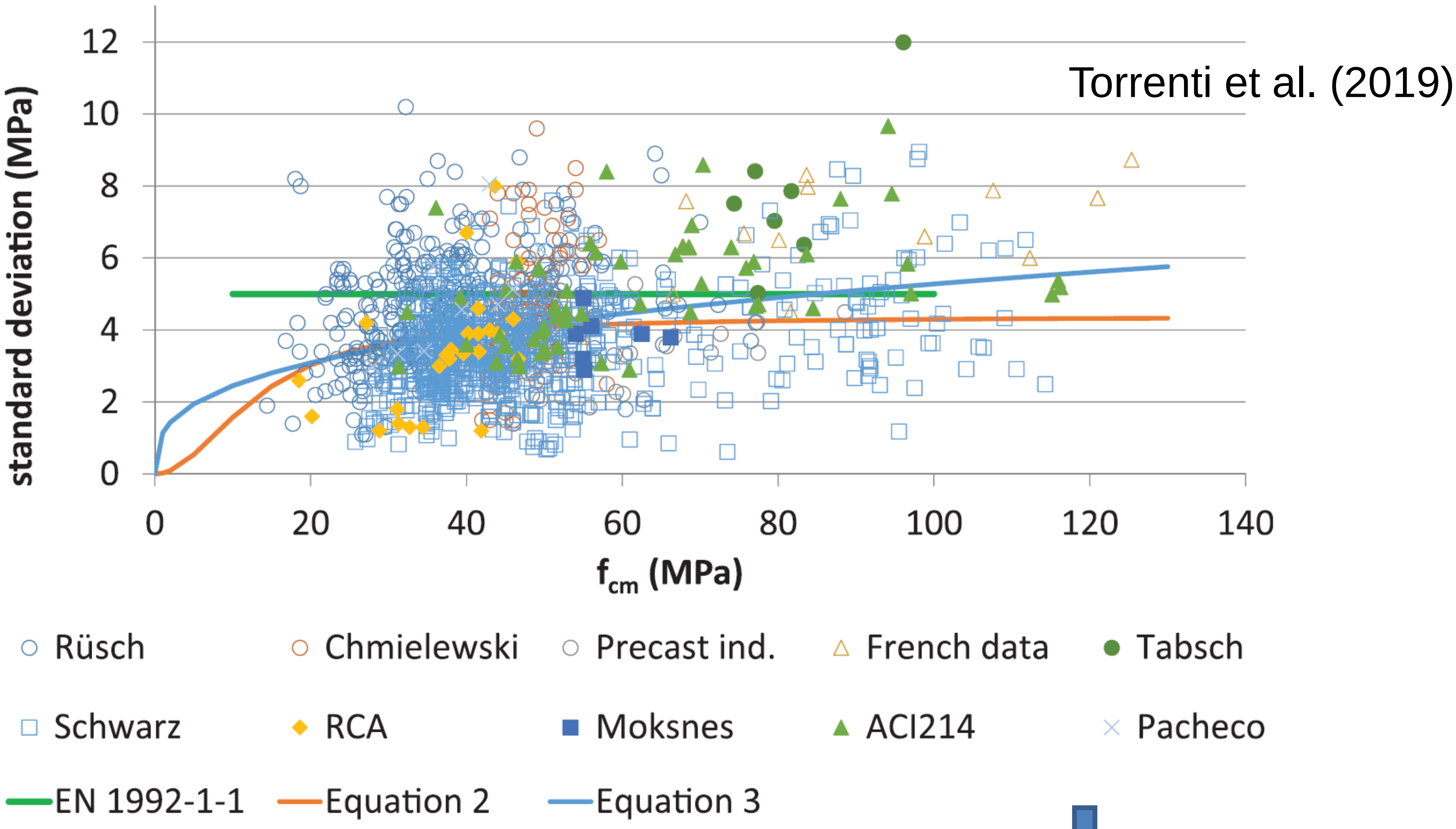
Torrenti et al. (2019)

$f_{ck28} = f_{cm28} - 8$ (MPa) ?
Eurocode 2

$f_{ck28} = f_{cm} - 1{,}645.\sigma = f_{cm} - 1{,}645 \times 5 = f_{cm} - 8{,}22$ MPa

Et pour des bétons modernes ?

5 Un peu de probabilité



$$SD_{\mathrm{fit}} = 1 / \left(m + \frac{n}{f_{\mathrm{cm}}{}^{2}} \right) \qquad (2)$$

Est-on sécuritaire ?

$$\mathrm{SD}_{\mathrm{fit}} = a f_{\mathrm{cm}}{}^{\mathrm{b}} \qquad (3)$$

Est-ce que cela dépend du nombre d'essais ?

5 Un peu de probabilité

Intervalle de confiance ou combien je fais d'essais ? :

intervalle de confiance associé à l'espérance d'une variable de loi normale de variance inconnue (Attention donc aux hypothèses !)

Théorème — L'intervalle de confiance de μ (moyenne réelle) au seuil de confiance α est donné par :

$$\left[\overline{x} - t^{n-1}_{(1-\alpha/2)}\frac{S}{\sqrt{n}}\,,\overline{x} + t^{n-1}_{(1-\alpha/2)}\frac{S}{\sqrt{n}}\right]$$

Estimateur de l'espérance

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\Sigma_{i=1}^{n} x_i$$

Estimateur non-biaisé de la variance.

$$S^2 = \frac{1}{n-1}\Sigma_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2$$

Student

n-1	75%	80%	85%	90%	95%	97.5%	99%	99.5%	99.75%	99.9%	99.95%
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

Convergence vers la loi normale

5 Un peu de probabilité

Intervalle de confiance ou combien je fais d'essais ? :

Exemple : résistance en compression

Éprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Résistance [MPa]	30,6	38,2	33,4	36,5	34,2	37,5	35,2	29,5	37,7

Estimation de la moyenne et Intervalle de confiance (IC) à 95% ?
Incertitude de type A

N = 3 essais (3 premières valeurs) :

- Moyenne (estimation) de 34,1 MPa
- t = 2,92
- Ecart-type de 3,8 MPa
- IC à 95 % [27,6 – 40,5 MPa]
- Incertitude de type A : 2,22 MPa

Résistance caractéristique :

- Loi normale

$f_{ck28} = f_{cm} - 1{,}645.\sigma = 27{,}7$ MPa

- Eurocode 2

$f_{ck28} = f_{cm28} - 8 = 26$ MPa

N = 9 essais :

- Moyenne (estimation) de 34,8 MPa
- t = 1,86
- Ecart-type de 3,13 MPa
- IC à 95 % [32,8 – 36,7 MPa]
- Incertitude de type A : 1,04 MPa

Résistance caractéristique :

- Loi normale

$f_{ck28} = f_{cm} - 1{,}645.\sigma = 29{,}6$ MPa

- Eurocode 2

$f_{ck28} = f_{cm28} - 8 = 26{,}7$ MPa

Plus le nombre d'essais augmente, mieux on estime la moyenne !

Plan - Introduction aux méthodes expérimentales

1. Pourquoi fait-on des mesures ?
2. Spécificité du Génie Civil
3. Que faire de la mesure ?
4. Exemple d'essais expérimentaux
5. Un peu de probabilité
6. **Erreurs en métrologie**
7. Quelques réflexions

6 Erreurs en métrologie

https://www.youtube.com/watch?v=GtOGurrUPmQ

Lectures by Walter Lewin. They will make you ♥ Physics.
691 k abonnés

Professeur au MIT

Entre 4’30 et 11,06

Source A. Fau

6 Erreurs en métrologie

Incertitude sur les mesures (type B) :

$$f_c = \frac{F_{max}}{\pi D^2/4} \qquad \varepsilon = \frac{u}{L}$$

- Lecture directe de distances avec une précision de ± 0,1 mm (pied à coulisse)
- Base de mesure de 20 cm
- Déplacement de 0,1 mm, précision de ± 5 µm (LVDT)
- Force maximum de 613 KN
- Diamètre mesuré de 159,6 mm
- La notice du capteur d'effort garantie une mesure à ± 5 KN

Pointeau de soutien de la couronne

Capteur longitudinal (Module d'Young)

Capteur transversal (Coefficient de Poisson)

Essai de détermination du module d'Young et du coefficient de Poisson (système J2P) et de la résistance en compression (16x32)

6 Erreurs en métrologie

Evaluation de type B de l'incertitude-type (mesure unique)

Selon les informations données par le constructeur et/ou les connaissances du processus, l'incertitude-type va dépendre du choix de la loi de distribution de la grandeur mesurée X. Voici quelques exemples de lois et leur incertitude-type associée u_b pour une grandeur X dont les valeurs x_i sont comprises entre $\bar{x} - \delta$ et $\bar{x} + \delta$:

loi normale : $u_b = \frac{\delta}{3}$;

loi triangulaire : $u_b = \frac{\delta}{\sqrt{6}}$;

loi uniforme ou rectangulaire : $u_b = \frac{\delta}{\sqrt{3}}$.

NB : Si le constructeur ne fournit rien, il faut procéder à l'évaluation expérimentale de l'appareil.

Exemple :

Mesure de longueur avec un réglet ou un pied à coulisse

$$u_b = \frac{\delta/2}{\sqrt{3}} = \frac{\delta}{\sqrt{12}}$$

l'amplitude δ du support est égale à l'écart entre deux des plus petites graduations de l'appareil de mesure.

Source X. Jourdain

Evaluation de l'incertitude-type composée

L'incertitude sur une chaîne de mesure est calculée à partir de la loi de propagation de l'incertitude :

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (u_{x_i})^2$$

la variance composée u^2_c peut ainsi être considérée comme la somme des variances estimées de la contribution de chaque variable x_i. La loi se base sur un développement de Taylor à l'ordre 1 en négligeant les termes croisés (hypothèse des variables indépendantes). Si les variables ne sont pas indépendantes il faut prendre en compte les termes croisés, et si la fonction *f* est fortement non-linéaire, il est nécessaire de prendre un développement de Taylor à un ordre supérieur

Source X. Jourdain

6 Erreurs en métrologie

Le **calcul d'erreur**, ou **calcul d'incertitudes** est un ensemble de techniques permettant d'estimer l'erreur faite sur un résultat numérique, à partir des incertitudes ou des erreurs faites sur les mesures qui ont conduit à ce résultat. Ceci permet donc d'estimer la propagation des erreurs.

Erreur de mesure

Il faut considérer trois sources d'erreur (*uncertainty* en anglais) :

- la dispersion statistique Δ_1 (*precision* en anglais) => incertitude de type A;
- la précision de la mesure Δ_2, ou l'incertitude (*resolution* en anglais) => incertitude de type B;
- l'erreur systématique Δ_3 (*accuracy* en anglais).

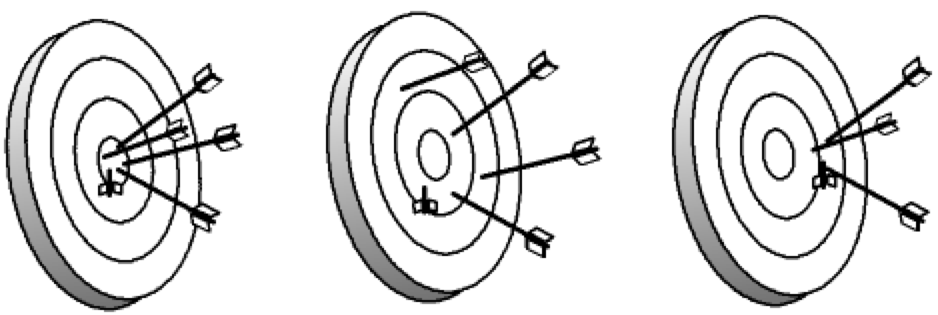
l'erreur totale étant « $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$ »

6 Erreurs en métrologie

Si l'on fait la comparaison avec des flèches que l'on tire sur une cible :
a) la dispersion statistique ou erreur aléatoire (*precision*) désigne le fait que les flèches sont proches les unes des autres, ou bien au contraire éparpillées sur la cible ;
b) la précision de mesure (*resolution*) désigne la taille de la pointe de la flèche ;
c) l'erreur systématique ou biais (*accuracy*) indique si les flèches visaient bien le centre, ou bien un autre point de la cible.

Mesure :
- Exact (fidèle et juste) = (1)
- Juste = (2) (moyenne sur la cible)
- Fidèle = (3)

Codifié, norme ISO 5725-X



(1) (2) (3)

Plan - Introduction aux méthodes expérimentales

1. Pourquoi fait-on des mesures ?
2. Spécificité du Génie Civil
3. Que faire de la mesure ?
4. Exemple d'essais expérimentaux
5. Un peu de probabilité
6. Erreurs en métrologie
7. **Quelques réflexions**

7 Quelques réflexions

Une mesure sans incertitudes est inutile

On ne peut qu'invalider les modèles ou définir des limites de validité

Essais « parfaits » : essais qui vont mobiliser différentes parties du modèle :

- Trajet et valeurs de forces/contraintes/déformations
- Géométrie adaptée
- …

permet aussi l'économie de temps et d'argent …

Dans les pondérations (ne pas mélanger les carottes et les bananes), il faut pondérer par l'inverse de l'incertitude