

Méthodes expérimentales

Capteurs

M2R MAISES / ECD

alexandra.bourdot@ens-paris-saclay.fr



ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN

2

école normale supérieure paris-saclay

Méthodes expérimentales

Organisation

3 CM:

- Incertitudes de mesure
- Images et Microscopies – Caractérisation microstructurale
- Capteurs

5 TPs:

Maises	ECD
Mesures acoustiques: Ultrasons	Mesures de diffusion
Mesures optiques	Mesures optiques
Perméation	Perméation
Micromorphologie	Micromorphologie
Poutre béton	Propriétés thermiques

Evaluation: 50% Examen / 50% TP

Les TP sont à préparer !

ENS- MAISES

Mise à jour le:	Vendredi	Mardi	Vendredi	Mardi	Mardi	Mercredi	Mardi	Mardi
08/10/2020 22:44	04-Dec	08-Dec	11-Dec	05-Jan	12-Jan	13-Jan	26-Jan	09-Feb
	14h-18h	8h-12h	14h-18h	14h-18h	14h-18h	14h-18h	8h-12h	8h-12h
Mesures acoustiques (AB, OY10)		1	2	3	4			
Mesures optiques (SC, OW)	1,2		3,4					
Perméation (MM, OW18)				2		3	4	1
Micromorphologie (KA, OW)				4	1		2	3
Poutre Béton (FB, OY10)	3	4		1	2			

Apportez une clé USB à tous les TP	
---	--

	Initiales			
1	AB	Alexandra Bourdot	LMT, ENS Paris-Saclay	alexandra.bourdot@ens-paris-saclay.fr
DEBUISNE ISRAEL	FB	Farid Benboudjema	LMT, ENS Paris-Saclay	farid.benboudjema@ens-paris-saclay.fr
2	SC	Sabine Caré	Lab. Navier, IFSTTAR	sabine.care@ifsttar.fr
DRAY DAHER	KA	Kamilia Abahri	LMT, ENS Paris-Saclay	kamilia.abahri@ens-paris-saclay.fr
TALA CHOUDJEM	MM	Maroua Maaroufi	LMT, ENS Paris-Saclay	maroua.maaroufi@ens-paris-saclay.fr
3				
KLINYAM AIT HAMADOUCHE				
TABCHOURY				
4				
RIBEIRO NOGUEIRA MASSAAD				
YANEZ CHURA				

ATTENTION :	L'absence à 1 TP conduit à une note égale à 0 Les TP sont à préparer
--------------------	---

Les TP sont à préparer !

ENS-ECD

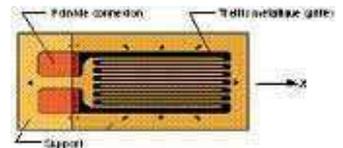
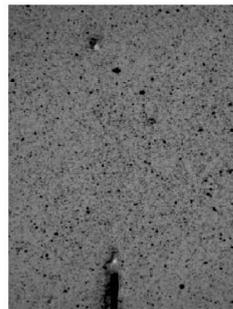
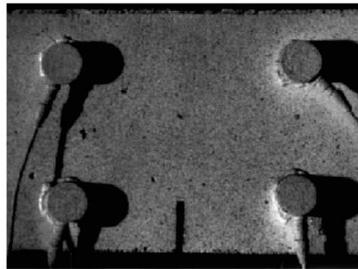
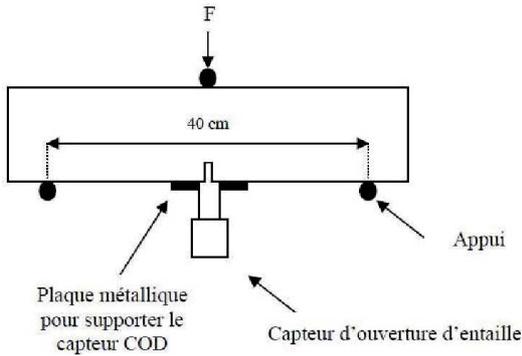
Mise à jour le:	Mardi	Mercredi	Mardi	Mercredi	Lundi	Mercredi	Vendredi	Mercredi
08/10/2020 22:44	10-Nov	18-Nov	24-Nov	25-Nov	30-Nov	02-Dec	04-Dec	09-Dec
	14h-18h	14h-18h	8h-12h	14h-18h	14h-18h	14h-18h	14h-18h	14h-18h
Diffusion (AB, OW18)	2	3		1				
Mesures optiques (SC, OW)						1,2		3
Perméation (MM, OW18)			1		2		3	
Micromorphologie (KA, OW)			2		3		1	
Fil chaud (MM, OT16)	1	2		3				

Apportez une clé USB à tous les TP	
---	--

	Initiales			
1	AB	Alexandra Bourdot	LMT, ENS Paris-Saclay	alexandra.bourdot@ens-paris-saclay.fr
TANNOUS HLAIHEL Sarah	FB	Farid Benboudjema	LMT, ENS Paris-Saclay	farid.benboudjema@ens-paris-saclay.fr
2	SC	Sabine Caré	Lab. Navier, IFSTTAR	sabine.care@ifsttar.fr
NASSAR HLAYHEL Sandos	KA	Kamilia Abahri	LMT, ENS Paris-Saclay	kamilia.abahri@ens-paris-saclay.fr
KHODER	MM	Maroua Maaroufi	LMT, ENS Paris-Saclay	maroua.maaroufi@ens-paris-saclay.fr
3				
EL DENNAWI SKAF				
4				

ATTENTION :	L'absence à 1 TP conduit à une note égale à 0 Les TP sont à préparer
--------------------	---

Quel(s) capteur(s) utiliser?



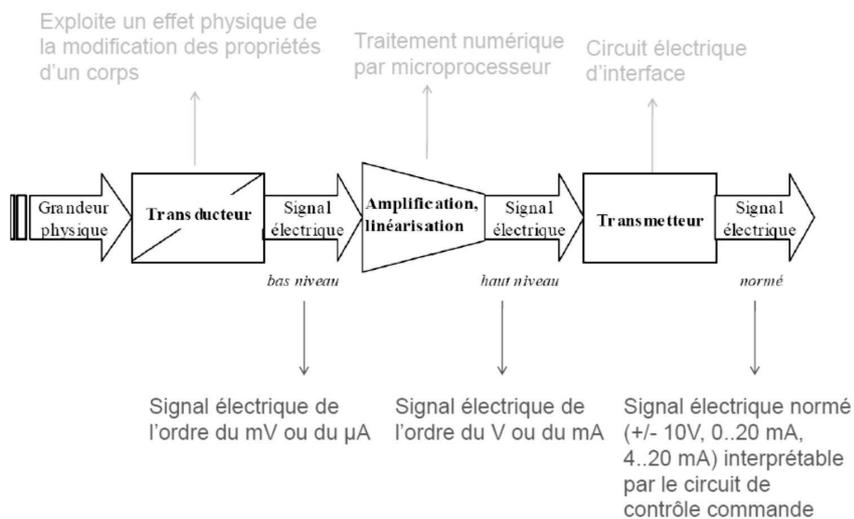
[Granger 2006; Alam 2011]

1- Généralités

• Métrologie

- Mesurer
- Instrument de mesure
- Transducteur - capteur

Schéma de principe d'un capteur industriel





1- Généralités

- Caractéristiques des instruments de mesure (et de leurs composants)
 - Etendue de mesurage (plage)
 - Résolution
 - Précision
 - Sensibilité
 - Fidélité
 - Autres caractéristiques :
Linéarité, temps de réponse, bande passante...



1- Généralités

- Grandeurs d'influence
 - = *Grandeur physique* autre que le mesurande dont la variation peut modifier la réponse du capteur
 - Température
 - Pression, vibrations
 - Humidité
 - Champs magnétiques
 - Tension d'alimentation

Minimisation de leur impact:

- Réduire* les grandeurs d'influence (tables anti-vibration, blindages magnétiques...)
- Stabiliser* les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues
- Compenser* l'influence des grandeurs parasites par des montages adaptés (pont de Wheastone)

1- Généralités

- Les capteurs :
 - Passifs :

MESURANDE	EFFET UTILISE (Grandeur de sortie)	MATERIAUX
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre, semi-conducteurs
Très basse température	Cste diélectrique	Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

- Actifs :

MESURANDE	EFFET UTILISE	GRANDEUR DE SORTIE
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

1- Généralités

- actifs :

- Ils fonctionnent comme un **générateur** : un effet physique assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à mesurer (énergie thermique, mécanique ou de rayonnement).

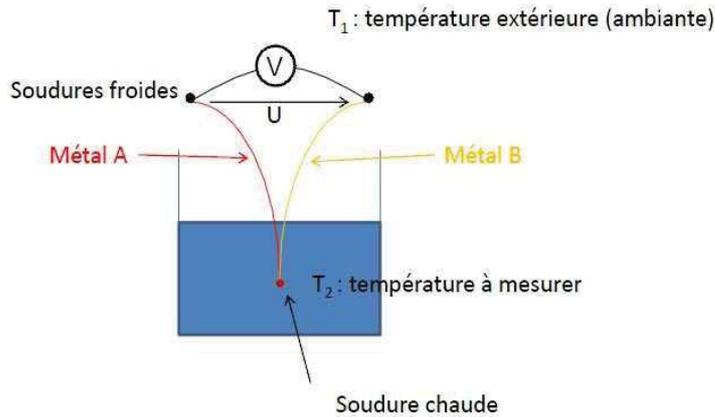
MESURANDE	EFFET UTILISE	GRANDEUR DE SORTIE
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

2- Mesure de Température

2.1- Thermocouples

• Principe:

- 2 fils métalliques : alliage \neq
- Soudure chaude : Effet de Peltier = $f(\text{alliage}, T)$
→ différence de potentiel
- Soudure froide: Effet Thomson → fem
→ une différence de température entre les deux jonctions crée un courant
Fem : μV pour T_{amb} à qqs dizaines de mV

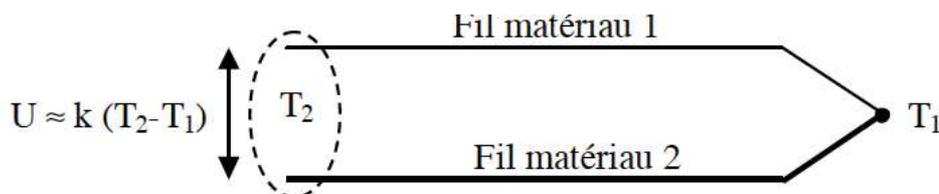


2- Mesure de Température

2.1- Thermocouples

• Principe:

- 2 fils métalliques : alliage \neq
- **Effet Seebeck** utilisé: lorsque les deux jonctions de deux fils de nature différentes sont portées à des températures différentes, création d'une différence de potentiel qui croît avec la différence de température



Thermocouple

2- Mesure de Température

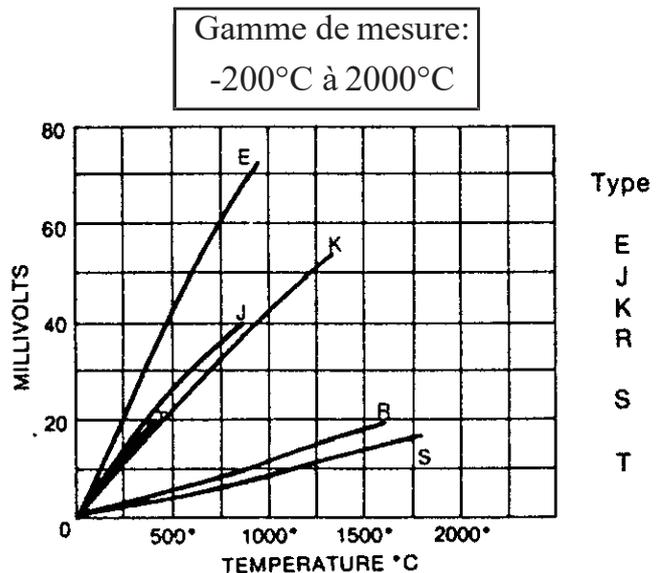
2.1- Thermocouples

THERMOCOUPLES THERMOKOPPELS			IEC 584		DIN 43710/43713 43714		ANSI MC 96.1		BS 4937		NF C 42-324	
CODE	MATERIAUX / MATERIAL		Identification / Vaststelling		Identification / Vaststelling		Identification / Vaststelling		Identification / Vaststelling		Identification / Vaststelling	
	+	-	THL	AGL	THL	AGL	THL	AGL	THL	AGL	THL	AGL
T	Cu	CuNi	TX	-25 +100°C			TX	0..+100°C			TX	-25 +100°C
U	Cu	CuNi			Cu-CuNi	0..+200°C						
J	Fe	CuNi	JX	-25 +200°C			JX	0..+200°C	JX	0..+200°C	JX	-25 +200°C
L	Fe	CuNi			Fe-CuNi	0..+200°C						
E	NiCr	CuNi	EX	-25 +200°C			EX	0..+200°C	EX	0..+200°C	EX	-25 +200°C
K	NiCr	Ni	KX	-25 +200°C	NiCr-Ni	0..+200°C	KX	0..+200°C	KX	0..+200°C	KX	-25 +200°C
	NiCr	Ni										
	NiCr	Ni							VX	0..+100°C		
N	NiCrSi	NiSi	NX	-25 +200°C								
R	PtRh 13	Pt					SX	0..+200°C			SC	0..+200°C
S	PtRh 10	Pt							SX	0..+200°C		
B	PtRh 30	PtRh 6					BX	0..+100°C			BC	0..+100°C
C	W5%Re	W26%Re										
D	W3%Re	W25%Re										

2- Mesure de Température

2.1- Thermocouples

Type	Limite (°C)	Adapté à	Force électromotrice (µV)
T	-192 à 400	Bonne précision à basse température	4277 à 100°C
J	-194 à 870	Milieux réducteurs, vide, inerte	27390 à 500°C
E	0 à 1000	Milieux oxydants, inerte	37000 à 500°C
K	0 à 1370	Milieux oxydants, inerte	41310 à 1000°C



Relation tension-température: Réponse non linéaire

Sensibilité : $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Précision : $0,2^\circ\text{C}$

$$T = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n$$

! Effets parasites \rightarrow Gainage

2- Mesure de Température

2.2- Thermistances

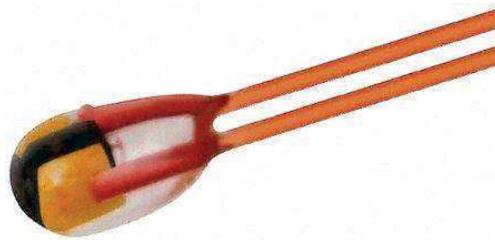
• Principe:

- Mélanges d'oxydes métalliques
- Leur résistance décroît avec T selon une loi du type:

$$R(T) = R_0 \exp (B (1/T - 1/T_0))$$

avec T entre -200°C et 1000°C (CTN)

- Utilisation sur de faible plage: 100°C où elles sont très sensibles (sensibilité environ 10 fois supérieure)

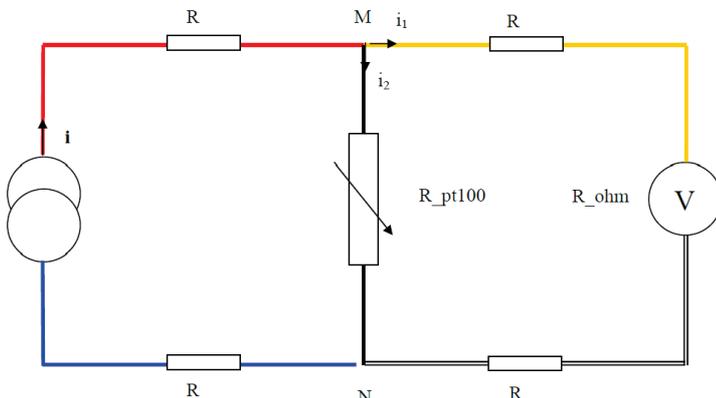
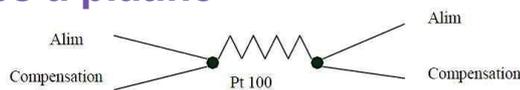


2- Mesure de Température

2.3- Sondes de résistances à platine

• Principe:

- Montage à 4 fils → Compensation de la résistance des lignes



$$R_{pt100} = U_{MN}/i \quad R(0^\circ\text{C}) = 100 \Omega$$

$$R(\Theta) = R(0^\circ\text{C}) (1 + a \Theta + b \Theta^2 + c \Theta(\Theta - 100))$$

Métal	Symbole	Résistivité Ω-cm/f	Résistivité Ω-mm ² /m
Or	Au	13	2,1612e ⁻²
Argent	Ag	8,8	1,4629e ⁻²
Cuivre	Cu	9,26	1,5394e ⁻²
Platine	Pt	59	9,8083e ⁻²
Tungstène	W	30	4,9873e ⁻²
Nickel	Ni	36	5,9847e ⁻²

Changement de résistance électrique d'un conducteur soumis à une modification de sa température

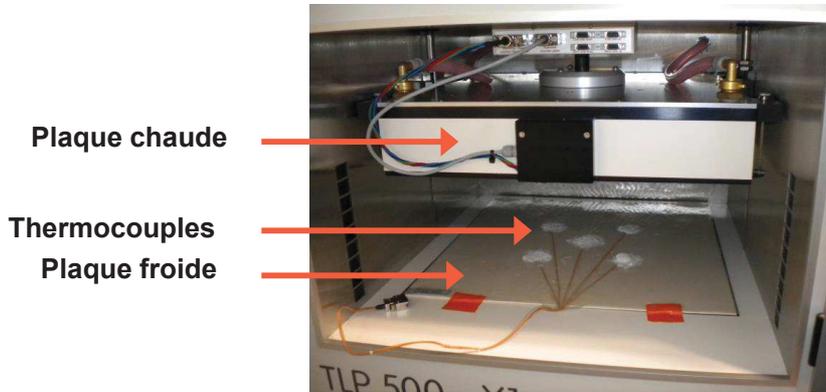


- Précision :
 - +/- 0,15 + (0,002 T)°C pour Classe A
 - +/- 0,30 + (0,005 T)°C pour Classe B
- Etendue de mesure : -200°C à 850°C

- Bonne stabilité chimique
- Temps de réponse > thermocouple

2- Mesure de température
2.4- Exemples

Méthode de la plaque chaude gardée
Conductivité thermique



EN 12667-2001



Bain thermostaté

école normale supérieure paris-saclay

2- Mesure de température
2.4- Exemples

Méthode de la plaque chaude gardée

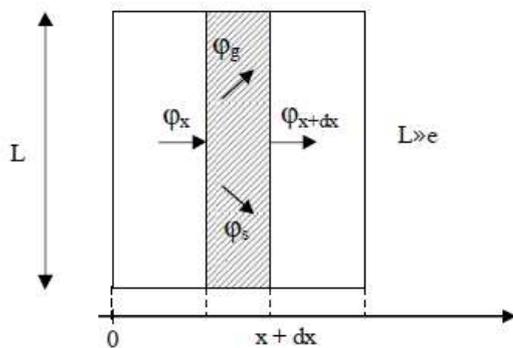


Figure 1.1 : Bilan thermique sur un système élémentaire

Avec des thermocouples

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} A$$

Avec des fluxmètres

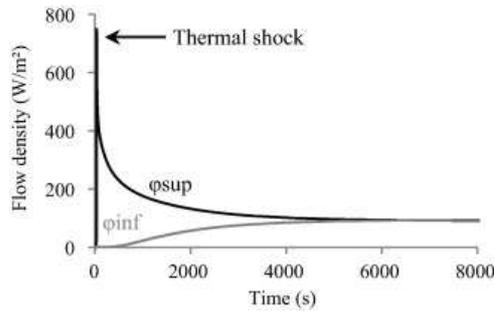
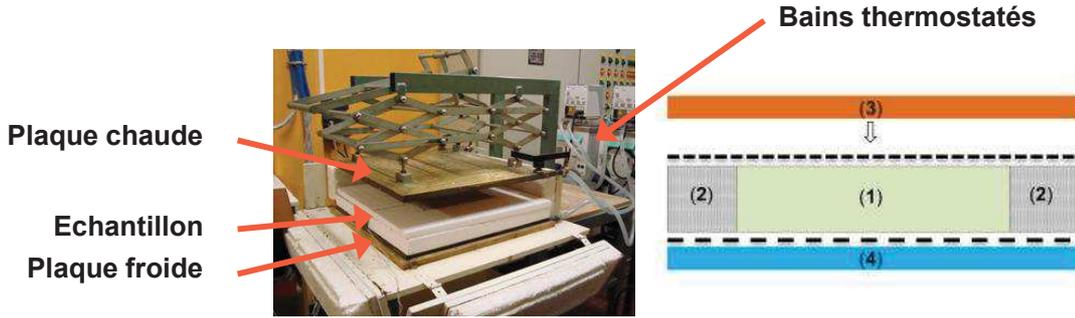
$$R = \frac{T_1 - T_2}{f e_h}$$

$$\lambda_t \text{ ou } \lambda = \frac{f e_h d}{T_1 - T_2}$$

école normale supérieure paris-saclay

2- Mesure de température
2.4- Exemples

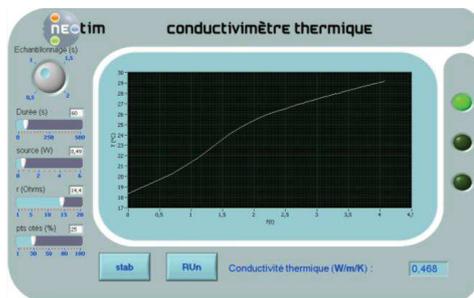
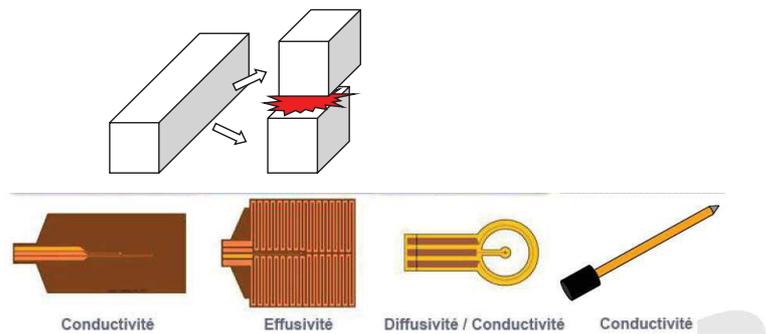
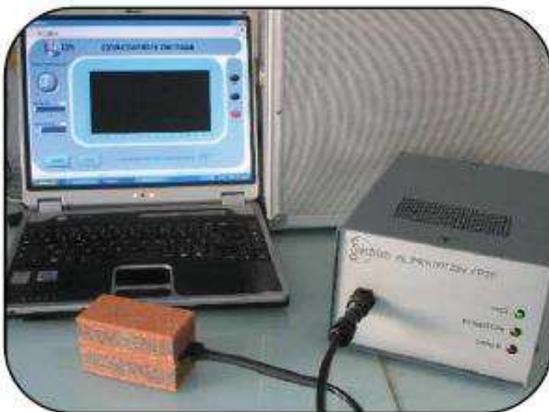
Méthode de la plaque chaude gardée
Chaleur spécifique massique



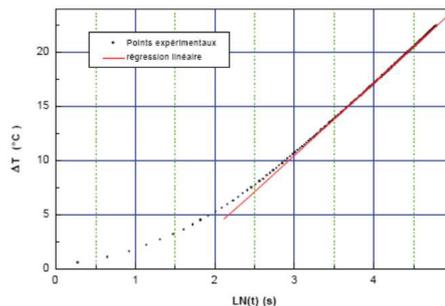
$$C_p = \frac{\int_0^t (\varphi_{sup} - \varphi_{inf}) \cdot dt}{\rho \cdot e \cdot \Delta T}$$

2- Mesure de température
2.4- Exemples

Méthode du fil chaud



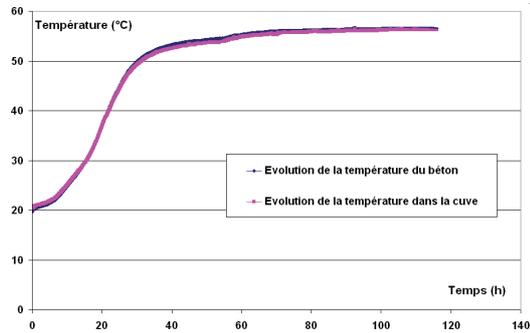
$$\Delta T(t) = \alpha \ln(t) + \beta \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{Q}{4\pi\alpha}$$



2- Mesure de température

2.4- Exemples

Comparaison thermocouples – PT100 (béton)



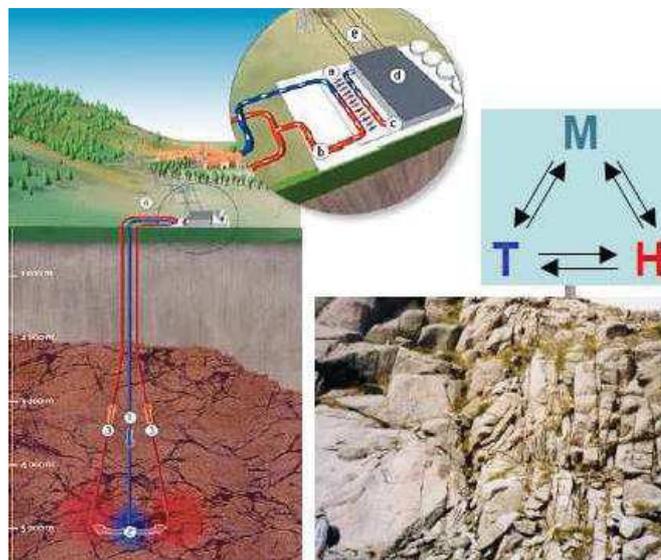
Mesure de la température de l'air et de la roche par PT100

école
normale
supérieure
paris-saclay

2- Mesure de température

2.4- Exemples

Développement d'une cellule d'essai sur l'écoulement d'un fluide

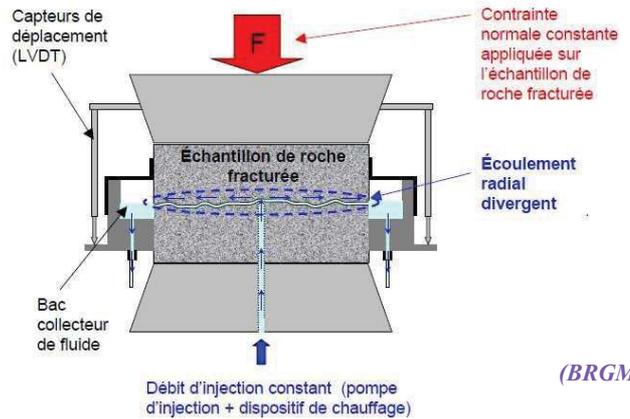
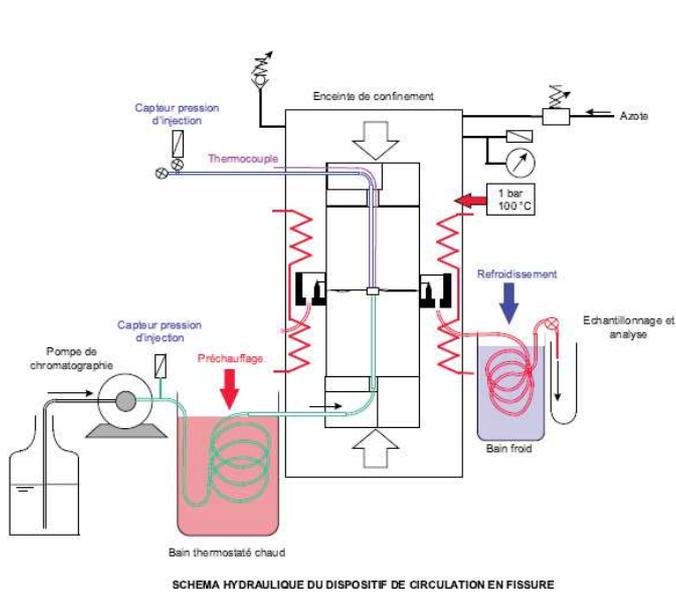


école
normale
supérieure
paris-saclay

2- Mesure de température

2.4- Exemples

Développement d'une cellule d'essai sur l'écoulement d'un fluide



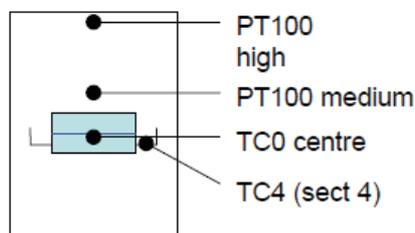
2- Mesure de température

2.4- Exemples

Développement d'une cellule d'essai sur l'écoulement d'un fluide



(BRGM)

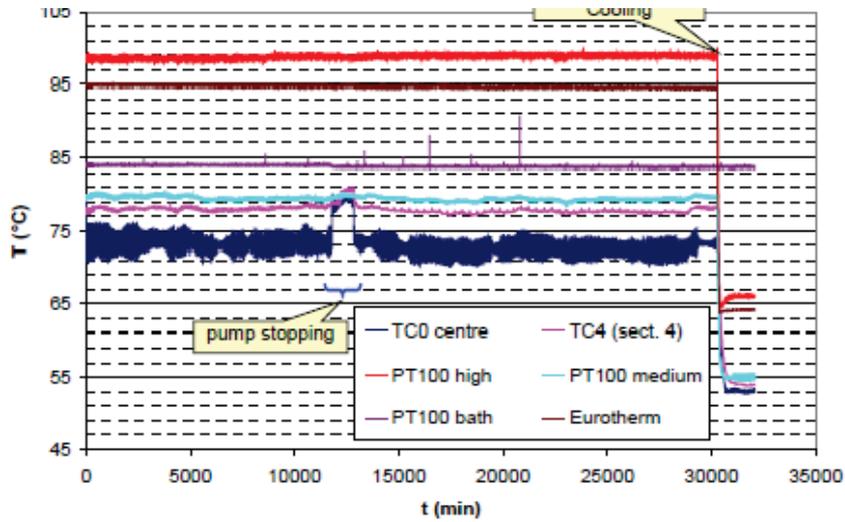


Paramètres	Imposés	Mesurés	Dispositifs
Mécaniques	Contrainte normale		Presse asservie en force
		Déplacements normaux relatifs des épontes de la fracture	Capteurs LVDT
Hydrauliques	Débit d'injection du fluide		Pompe de chromatographie
		Pression d'injection	Capteur de pression
		Débit sortant	Pesée par capteur de force
Thermiques		Température du fluide	Bain thermostaté + sonde PT100 au niveau du bain thermostaté + thermocouples (1 au centre de la fracture et 1 dans le réservoir annulaire)
		Température de l'enceinte	Eurotherm + 2 sondes thermiques PT100 (en haut et au milieu de l'enceinte)

2- Mesure de température

2.4- Exemples

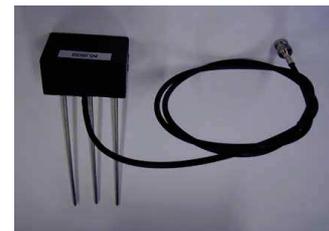
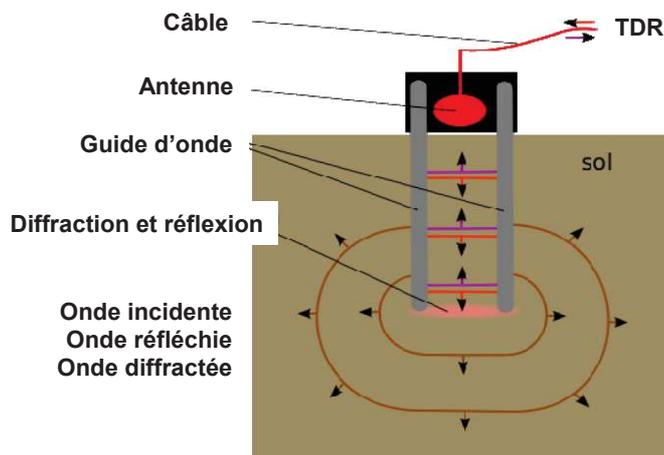
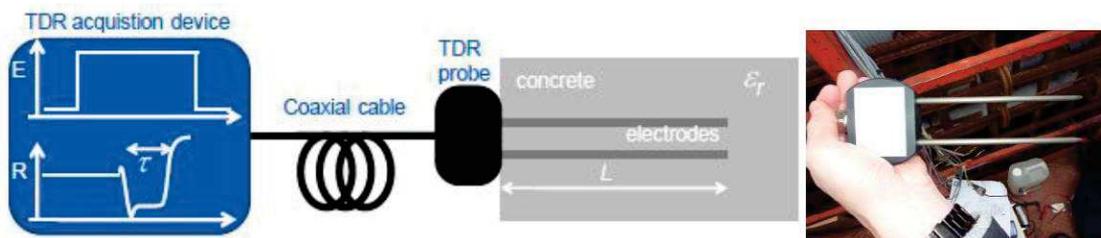
Développement d'une cellule d'essai sur l'écoulement d'un fluide



3- Mesure de la teneur en eau: TDR

• Réflectométrie dans le domaine temporel

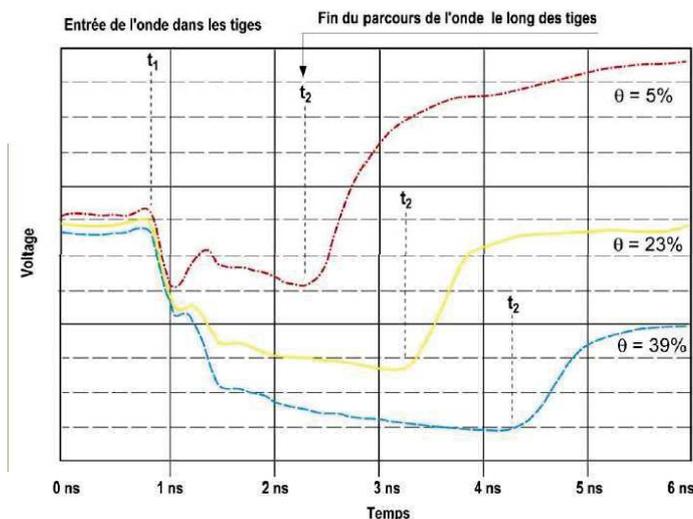
- Onde électromagnétique à haute fréquence : 1 MHz à 1 GHz



3- Mesure de la teneur en eau: TDR

- Réflectométrie dans le domaine temporel
 - Onde électromagnétique à haute fréquence : 1 MHz à 1 GHz

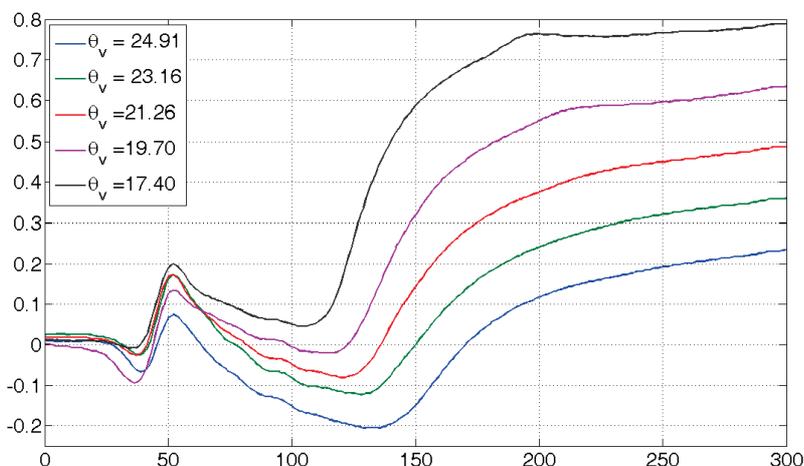
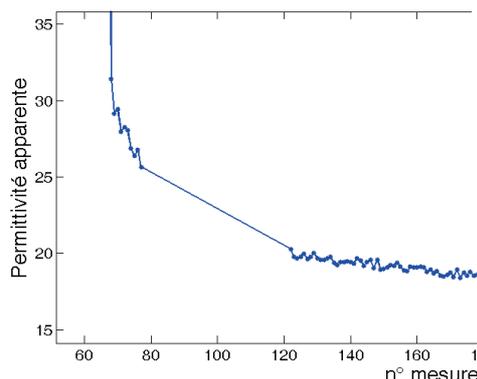
matériel	permittivité relative (ordre de grandeur)
air	1
matière organique	2 à 4
minéraux courants	2 à 4
eau	80



3- Mesure de la teneur en eau: TDR

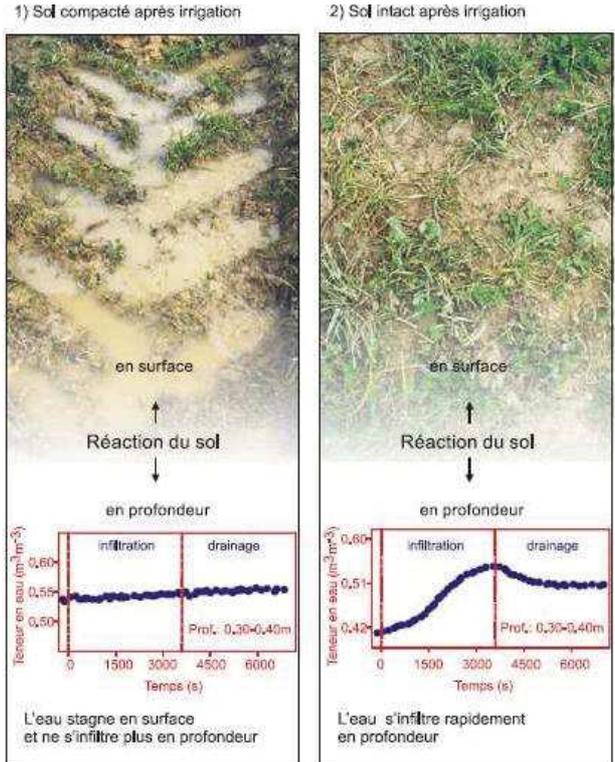
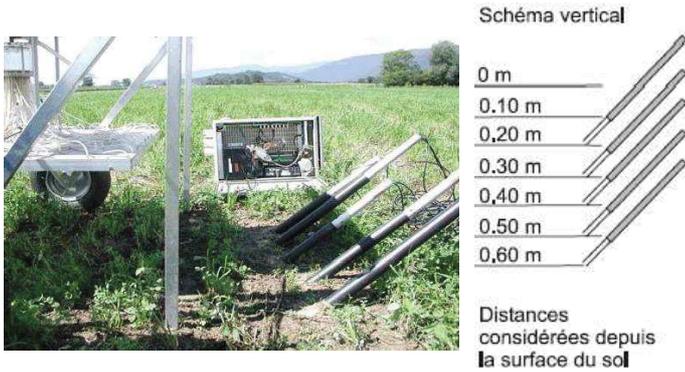
Relation humidité θ - constante diélectrique ϵ du sol

$$\theta = 4.3 \cdot 10^{-6} \epsilon^3 - 5.5 \cdot 10^{-4} \epsilon^2 + 2.92 \cdot 10^{-2} \epsilon - 5.3 \cdot 10^{-2}$$



3- Mesure de la teneur en eau: TDR

- Exemple : Compaction des sols



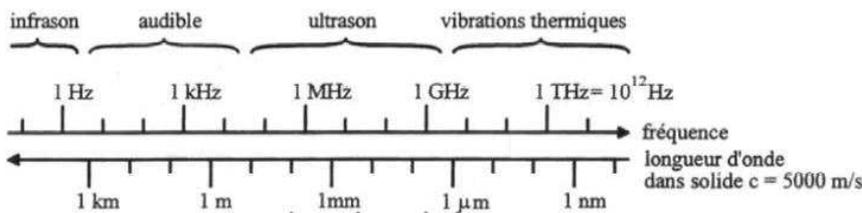
(OFEFP)

école normale supérieure paris-saclay

4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

- Qu'est ce qu'un ultrason?

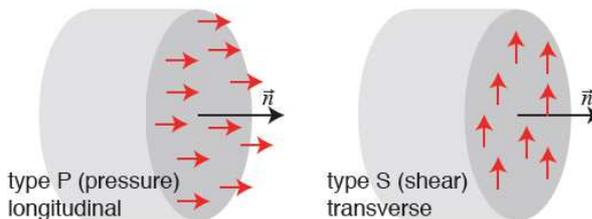
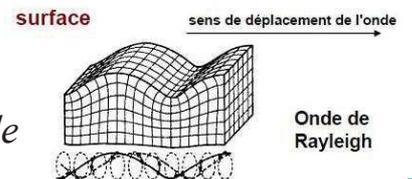
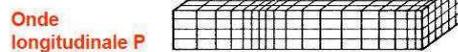
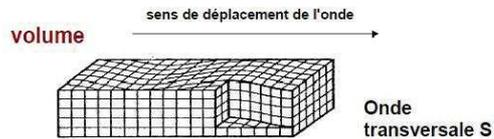


0,5 à 12 MHz

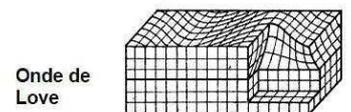
contrôle non destructif

microscope acoustique

Vibrations mécaniques de la matière à des fréquences inaudibles → Ebranlement des particules



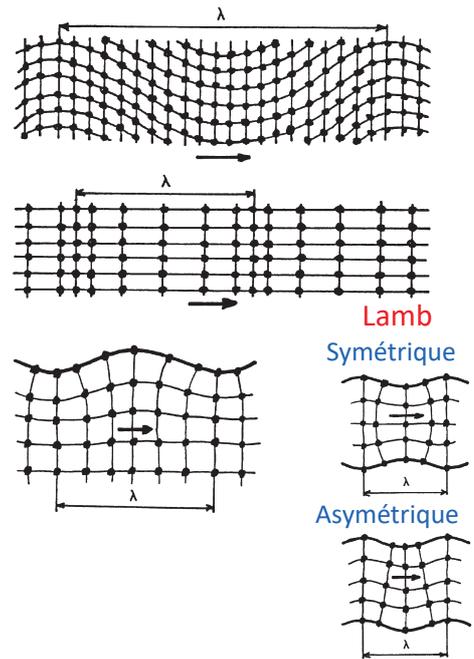
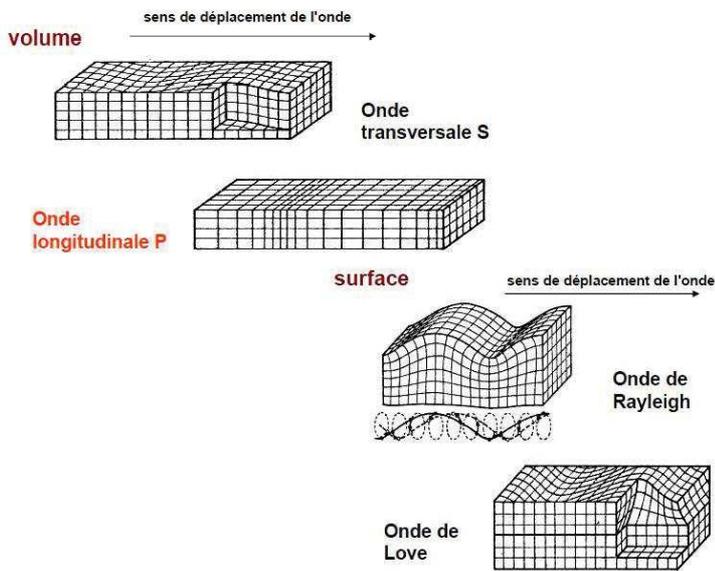
Types d'ondes en fonction du mode de vibration



4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

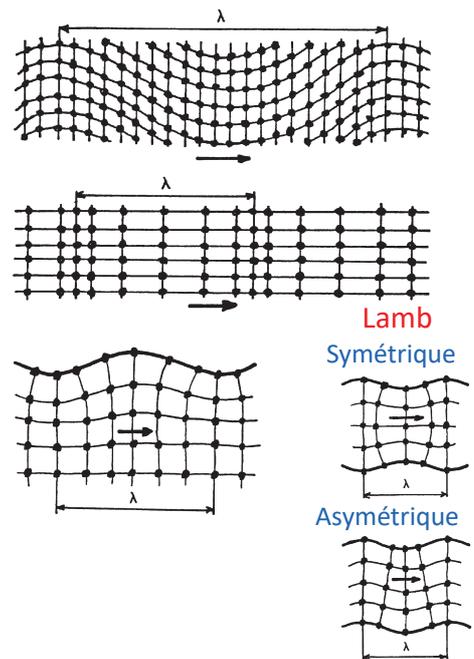
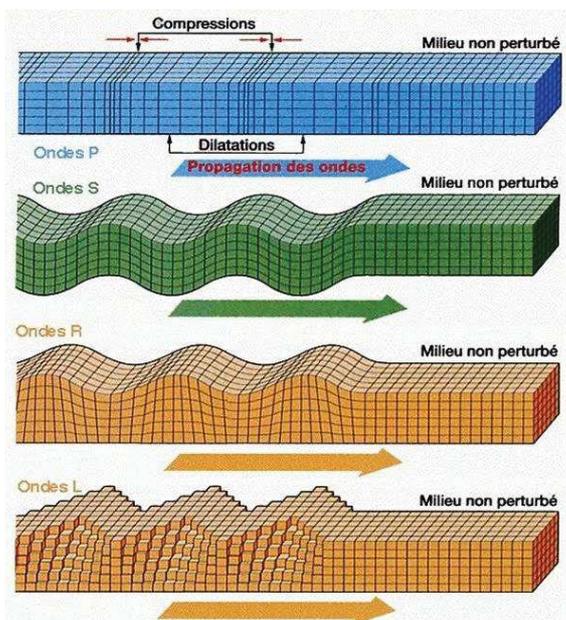
- Qu'est ce qu'un ultrason?



4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

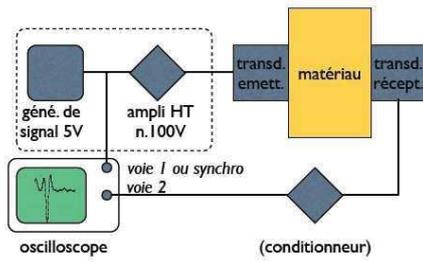
- Qu'est ce qu'un ultrason?



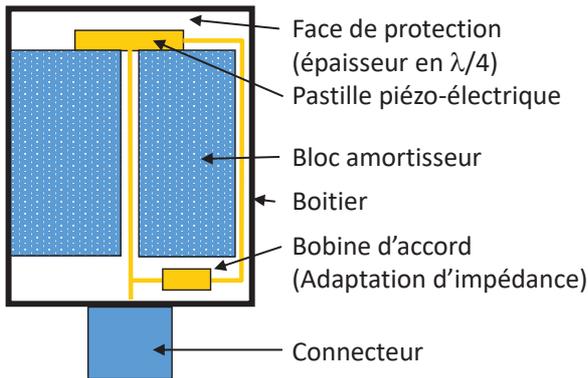
4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

- Chaîne de mesure

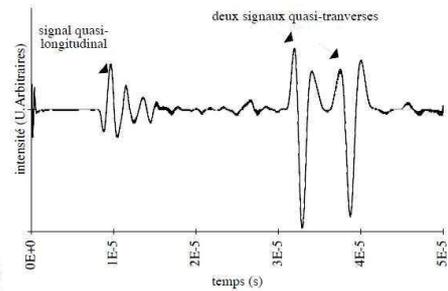
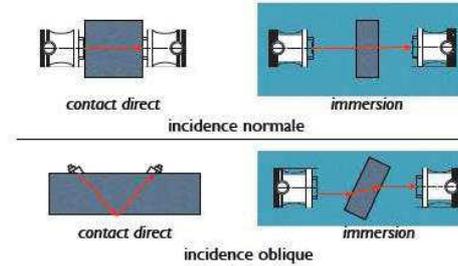


- Palpeur



ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN

- Type de mesures :
par réflexion
par transmission



école normale supérieure paris-saclay

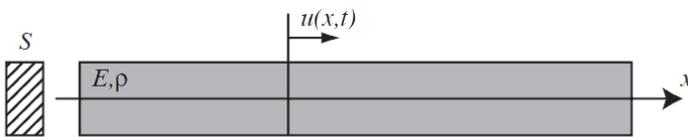
4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

• Introduction à la théorie des ondes élastiques

- 1D

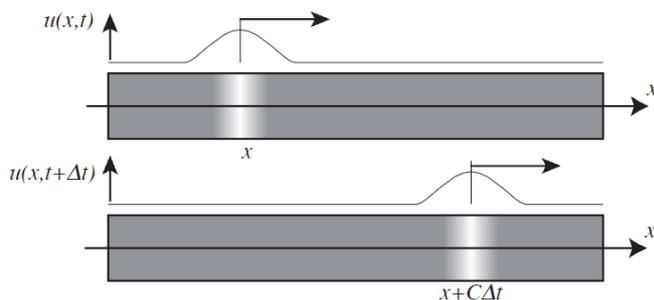
• Equation de propagation



Paramètres:

$$u(x,t); \epsilon(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}; \sigma(x,t)$$

• Onde progressive :



$$u = af\left(t - \frac{x}{C}\right)$$

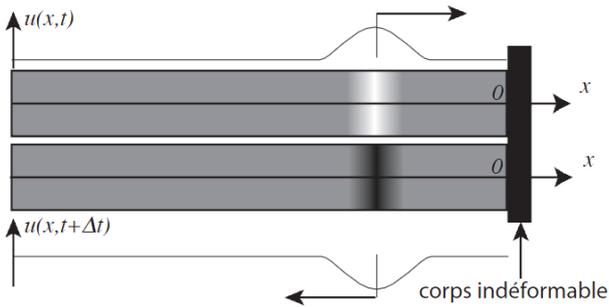
ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN

école normale supérieure paris-saclay

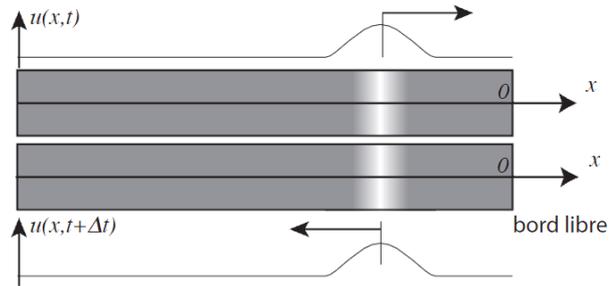
4- Propagation d'ondes
4.1- Mesures Ultrasonores

• Réflexion

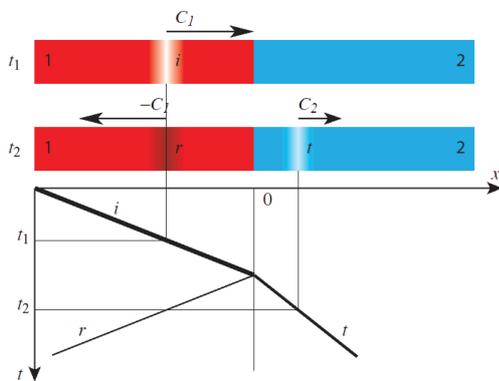
1. Bord encastré



2. Bord libre

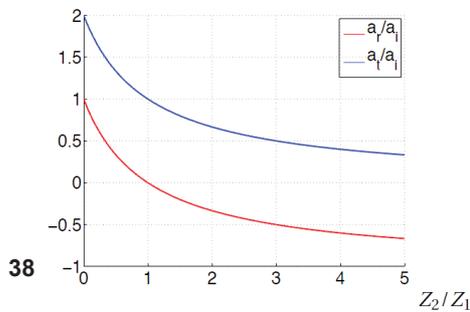


• Réflexion et transmission entre deux solides



• Impédance acoustique

Détermination des coefficients de réflexion (a_r/a_i) et de transmission (a_t/a_i)



école normale supérieure paris-saclay

4- Propagation d'ondes
4.1- Mesures Ultrasonores

3D (développement voir référence)

• Equation de propagation

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbb{C} : \boldsymbol{\varepsilon}$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

$$\vec{\text{div}}(\boldsymbol{\sigma}) + \vec{f} = \rho \ddot{\vec{u}}$$

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho u_{i,tt}$$

$$C_{ijkl} u_{k,lj} = \rho u_{i,tt} \rightarrow \vec{u}(\vec{x}, t) = \vec{a} f\left(t - \frac{\vec{n} \cdot \vec{x}}{C}\right)$$

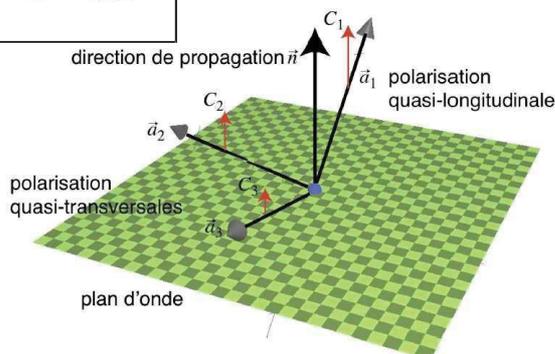
$$n_j C_{jikl} n_l a_k = \rho C^2 a_i$$

$$\vec{n} \cdot \mathbb{C} \cdot \vec{n} \cdot \vec{a} = \rho C^2 \vec{a}$$

$$\boldsymbol{\Gamma} \cdot \vec{a} = \rho C^2 \vec{a}$$

Tenseur acoustique ou de Christoffel

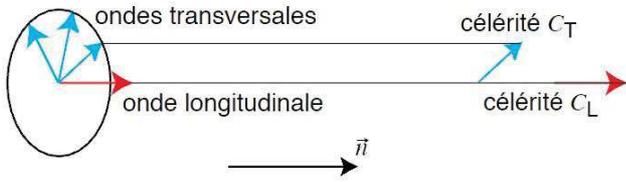
$$\boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \rho C_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \rho C_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \rho C_3^2 \end{bmatrix}_{\{\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3\}}$$



4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

• Milieu isotrope



$$\sigma = 2 \mu \varepsilon + \lambda \text{trace}(\varepsilon) I$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}_{\{\vec{n}, \bullet, \bullet\}}$$

$$\begin{aligned} \vec{a}_L &= \vec{n} \\ \rho C_L^2 &= \lambda + 2\mu \\ \vec{a}_T \cdot \vec{n} &= 0 \\ \rho C_T^2 &= \mu \end{aligned}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \rho C_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \rho C_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \rho C_3^2 \end{bmatrix}_{\{\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3\}}$$

$$\begin{aligned} C_L &= \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} \\ C_T &= \sqrt{\mu / \rho} \end{aligned}$$

4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

• Propriétés des matériaux

$$\begin{aligned} C_L &= \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} \\ C_T &= \sqrt{\mu / \rho} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho C_L^2 &= E \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \\ \rho C_T^2 &= \frac{E}{2(1 + \nu)} \end{aligned}$$

Matériau	Z_L ($10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)	Z_T ($10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)
Eau (20°C)	1,49	-
Huile légère	1,21	-
Mercure	19,8	-
Acier (1%C)	46,6	25,3
Aluminium	17	8,4

	(E, ν)	(K, μ)	(λ , μ)
E module d'Young		$E = \frac{9 K \mu}{3 K + \mu}$	$E = \mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu}$
ν coefficient de Poisson		$\nu = \frac{3 K - 2 \mu}{2 (3 K + \mu)}$	$\nu = \frac{\lambda}{2 (\lambda + \mu)}$
K module de compressibilité	$K = \frac{E}{3 (1 - 2 \nu)}$		$K = \frac{3\lambda + 2\mu}{3}$
μ module de cisaillement	$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$		
λ coefficient de Lamé	$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2 \nu)}$	$\lambda = \frac{3K - 2\mu}{3}$	

Matériau	V_L (m/s)	V_T (m/s)
Eau (20°C)	1480	-
Huile légère	1340	-
Mercure	1450	-
	5940	3220
Aluminium	2680	1100

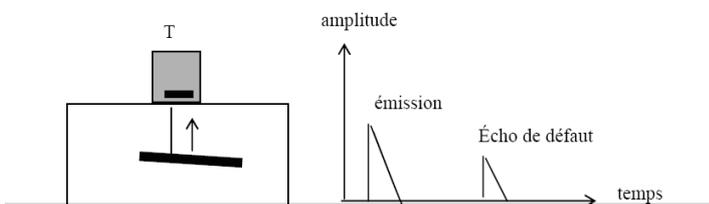
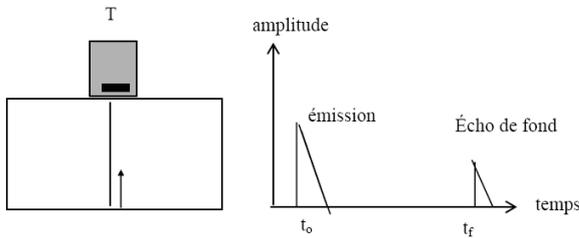
4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

Détection d'hétérogénéités localisées

- Contrôle par réflexion

Emetteur et Récepteur



Discontinuité du milieu
= réflexion partielle

But: analyse des échos

+ Phénomènes:

- Réflexion (Echo)
- Diffusion (Hétérogénéité)
- Absorption

4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

Détection d'hétérogénéités localisées

- Contrôle par réflexion

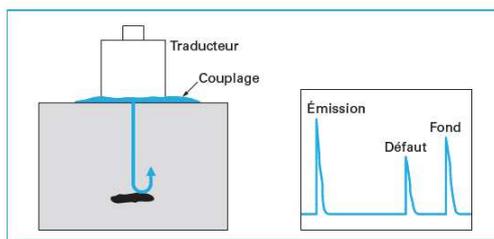


Figure 6 - Principe du contrôle par contact

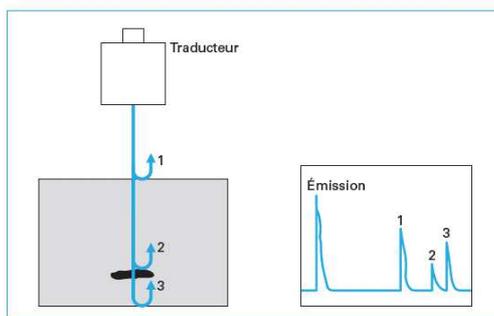


Figure 7 - Principe du contrôle par immersion

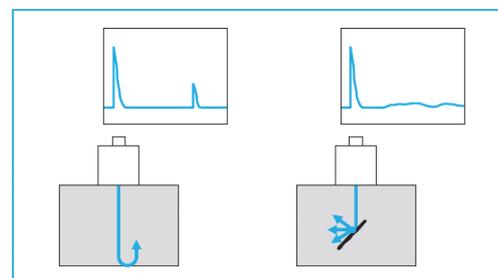


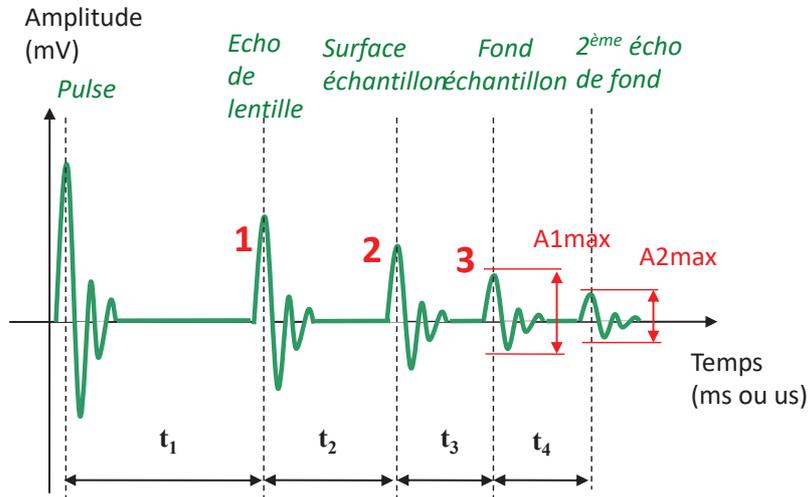
Figure 8 - Principe de la méthode par écho de fond

4- Propagation d'ondes
4.1- Mesures Ultrasonores

Détection d'hétérogénéités localisées

- Contrôle par réflexion

Emetteur et Récepteur

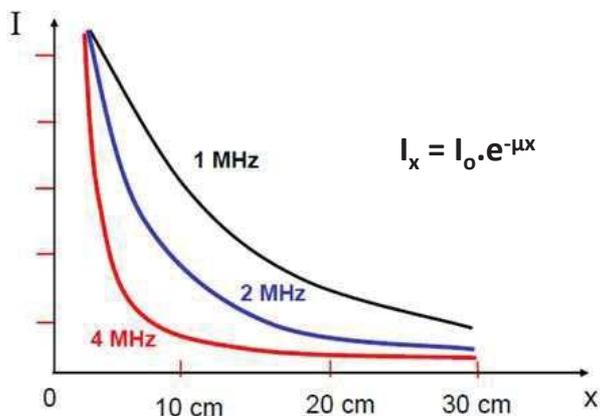


4- Propagation d'ondes
4.1- Mesures Ultrasonores

Détection d'hétérogénéités localisées

- Contrôle par réflexion

Atténuation



Discontinuité du milieu
= réflexion partielle

But: analyse des échos

+ Phénomènes:

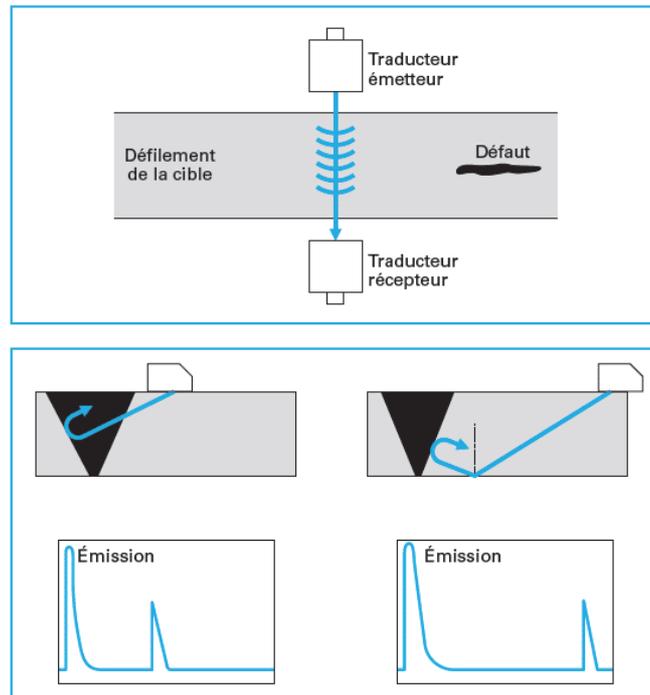
- Réflexion (Echo)
- Diffusion (Hétérogénéité)
- Absorption

4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

Détection d'hétérogénéités localisées

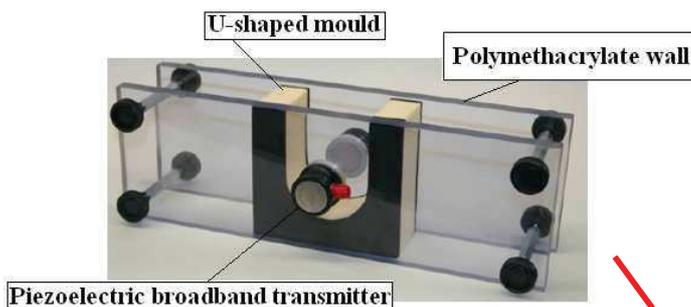
- Contrôle par transmission



4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

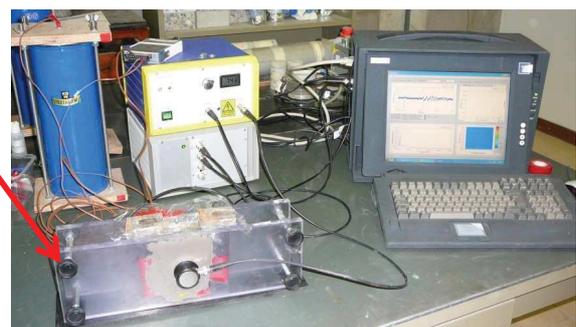
- Domaines d'application
 - Evaluation non destructive : microstructures et propriétés



Emission d'une onde de compression:

Générateur de fréquence à large bande (<100kHz)
 Amplificateur
 Emetteur d'ultrasons (piézoélectrique)

Erreur de répétitivité des mesures: 1%

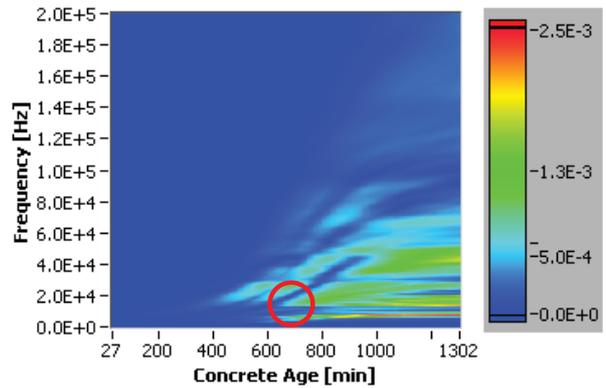
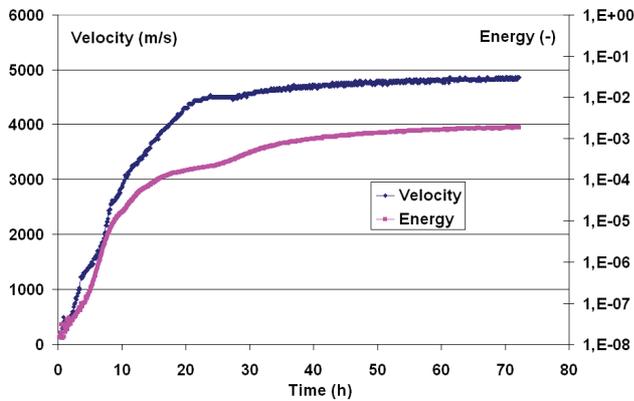


- Paramètres élastiques mesurés:
 - **Vitesse:** temps de parcours des ondes à travers le matériau, les détecteurs, les parois du moule
 - **Energie:** Intégration numérique des valeurs de l'amplitude au carré
 - **Fréquence:** Transformée de Fourier

4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

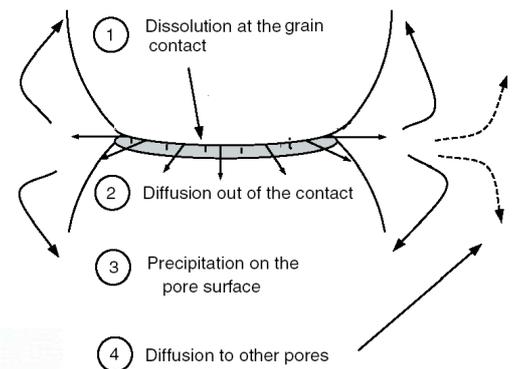
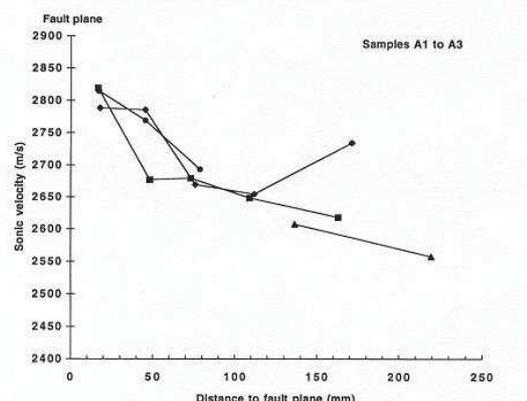
- Domaines d'application
 - Evaluation non destructive : microstructures et propriétés



4- Propagation d'ondes

4.1- Mesures Ultrasonores

- Domaines d'application
 - Evaluation non destructive : microstructures et propriétés

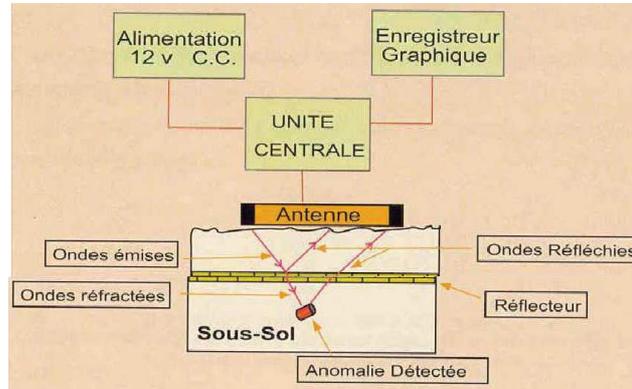


4- Propagation d'ondes

4.2- Radar

- Principe

 - = Procédé géophysique léger et non destructif



$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad P = \frac{vt}{2}$$

4- Propagation d'ondes

4.2- Radar

- Principe

 - = Procédé géophysique léger et non destructif



Source: CPFDF ©



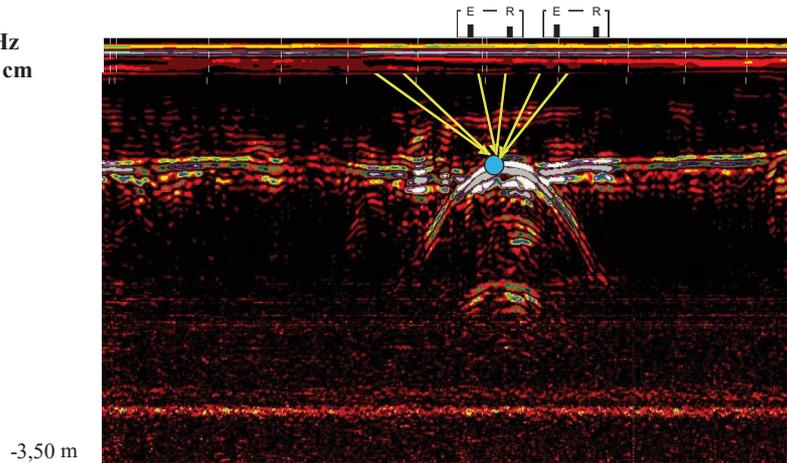
4- Propagation d'ondes

4.2- Radar

- Application

Fréquence de l'antenne (MHz)	Profondeur d'investigation (m)	Applications classiques
40	15-20	Géologie
70	10-15	Géologie, géotechnique
400	0-5	Génie Civil, réseaux enterrés, archéologie
900	0-1	Chaussée, structures en béton
1500	0-0,6	Chaussée, structures en béton haute résistance

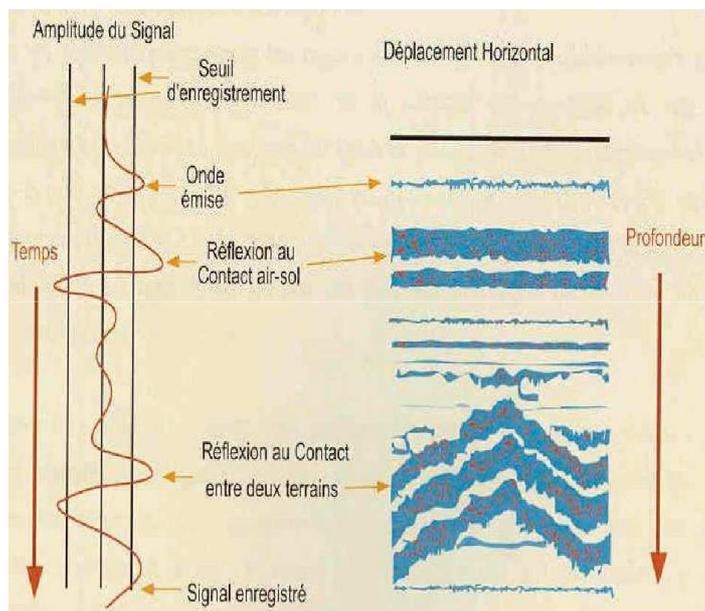
Antenne : 400 MHz
Distance E-R : 20 cm



4- Propagation d'ondes

4.2- Radar

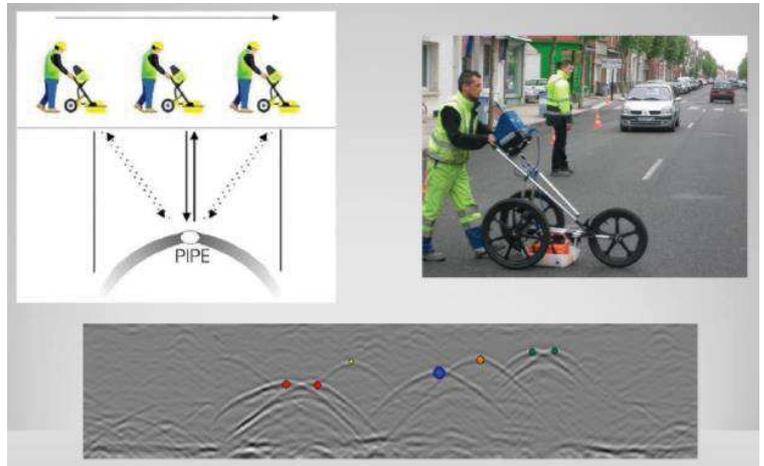
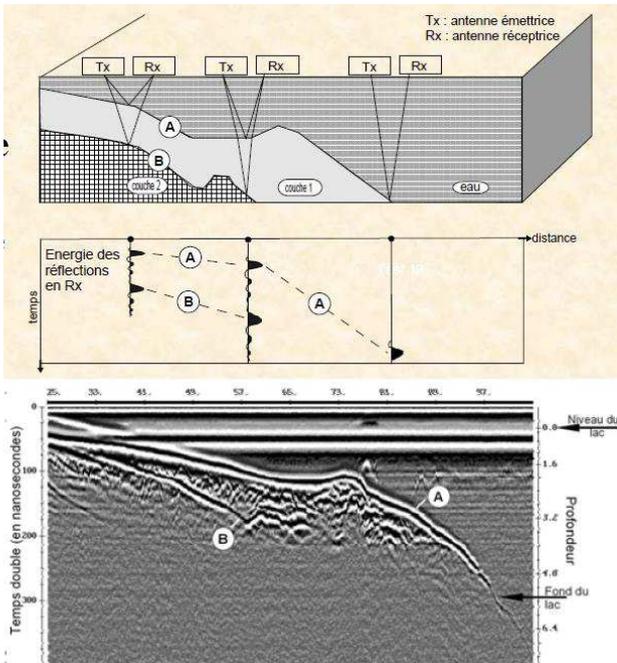
- Application



4- Propagation d'ondes

4.2- Radar

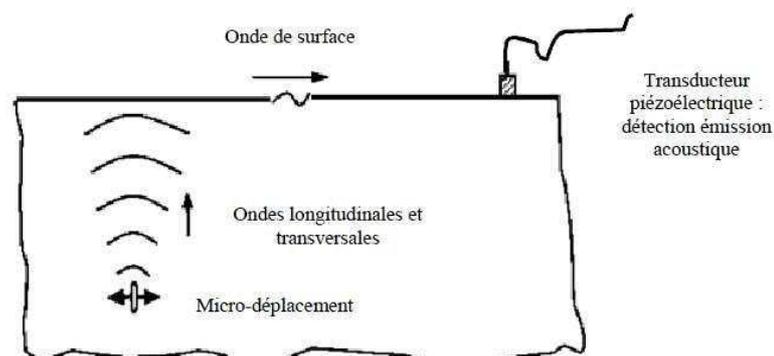
- Application



4- Propagation d'ondes

4.3- Emission acoustique

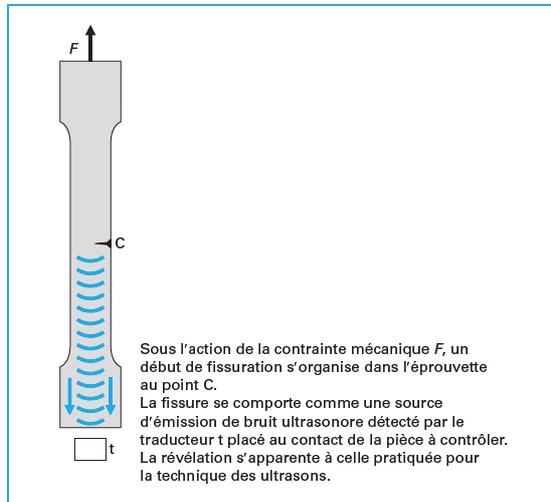
- Intérêts
 - La Fissuration = Paramètre important
- Emission acoustique
 - = technique d'investigation d'endommagements locaux dans le matériau
- Avantages:
 - Suivi de l'évolution du processus d'endommagement lors d'historiques de chargement
 - Détermination avec précision du temps du début de la fissuration
 - Progression de la fissuration



4- Propagation d'ondes

4.3- Emission acoustique

Principe



Facteurs d'influence

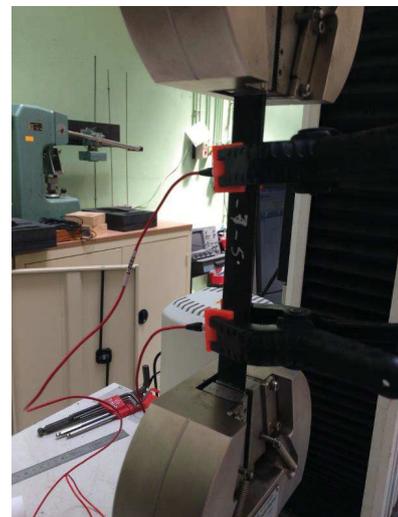
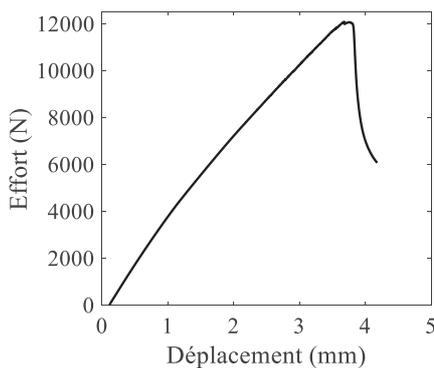
Facteurs favorisant des signaux de grande amplitude	Facteurs entraînant des signaux de faible amplitude
Résistance élevée	Résistance faible
Vitesse de déformation élevée	Vitesse de déformation faible
Anisotropie	Isotropie
Hétérogénéité	Homogénéité
Épaisseur importante	Épaisseur faible
Tendance à former des macles	Maclage très difficile
Rupture par clivage	Déformation par cisaillement
Températures basses	Températures élevées
Présence de défauts	Matériaux sans défaut
Transformation martensitique possible	Transformations de phase contrôlées par un phénomène de diffusion
Propagation de fissure	Déformation plastique uniforme
Structure brute de coulée	Structure forgée
Structure brute de soudage	Structure détensionnée
Taille de grain élevée	Structure à grains fins

4- Propagation d'ondes

4.3- Emission acoustique

Domaines d'application

- Données:
 - Accroissement de l'endommagement
 - Type de fissuration
 - Taille de la fissure
 - Energie
 - Orientation de la fissure



4- Propagation d'ondes

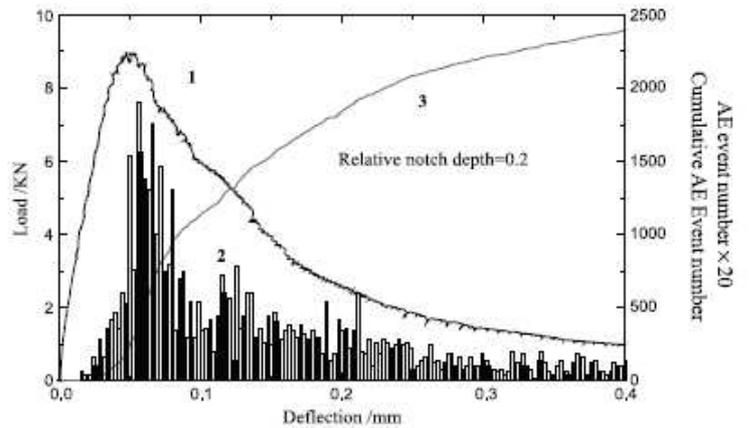
4.3- Emission acoustique

Domaines d'application

- Données:
 - Accroissement de l'endommagement
 - Type de fissuration
 - Taille de la fissure
 - Energie
 - Orientation de la fissure



ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN

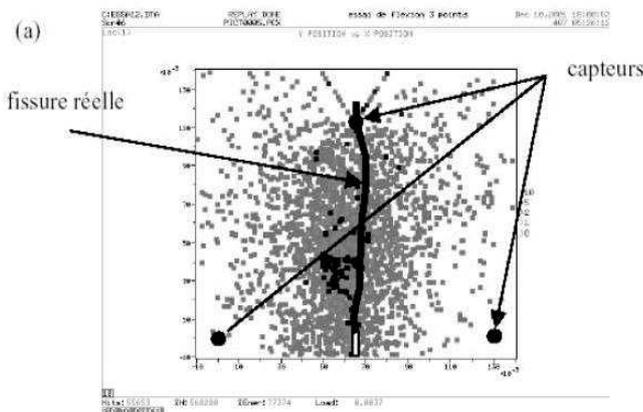


Evolution de l'activité acoustique en fonction du comportement mécanique lors d'un essai de flexion 3 points sur éprouvette prismatique entaillée (d'après Chen *et al.*, 2004)

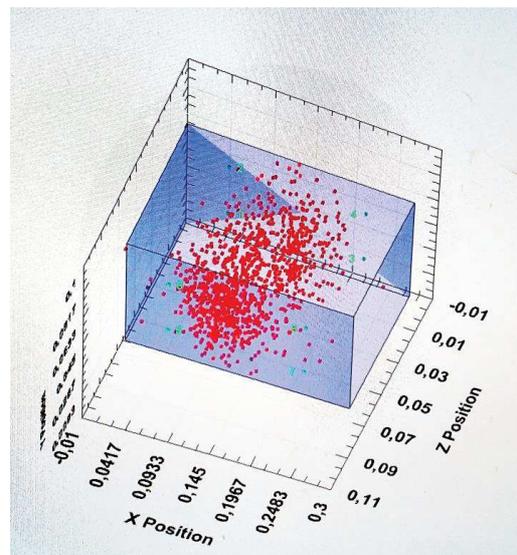
4- Propagation d'ondes

4.3- Emission acoustique

Domaines d'application



(Haidar *et al.*, 2005)

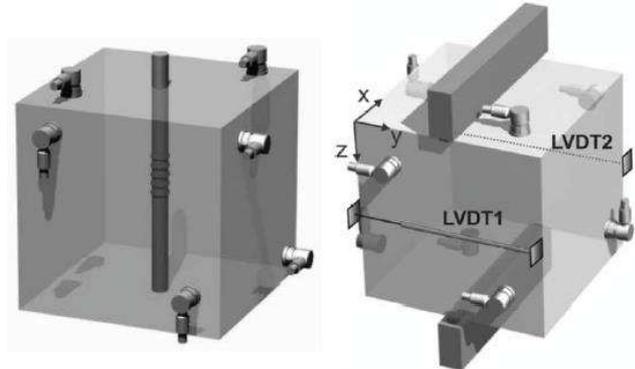


4- Propagation d'ondes

4.3- Emission acoustique

Domaines d'application

- Données:
 - Accroissement de l'endommagement
 - Type de fissuration
 - Taille de la fissure
 - Energie
 - Orientation de la fissure

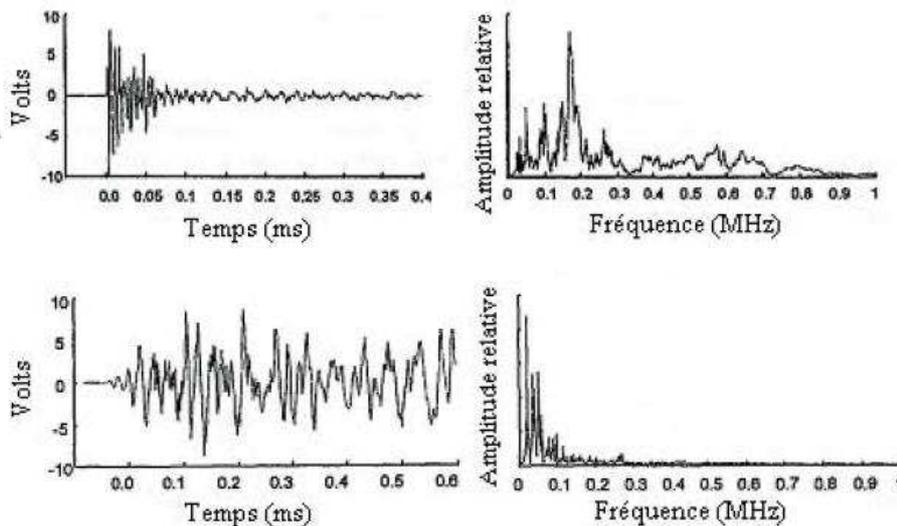


4- Propagation d'ondes

4.3- Emission acoustique

Domaines d'application

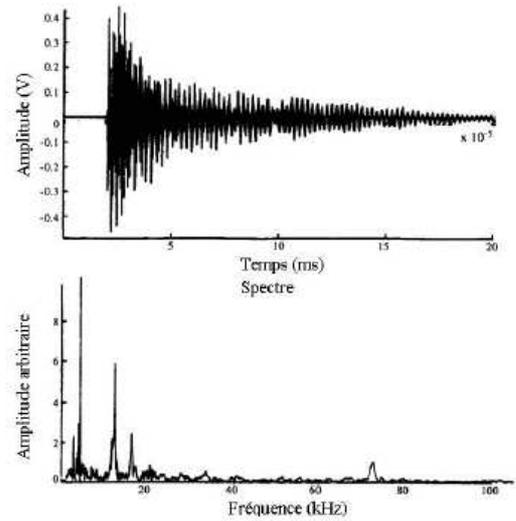
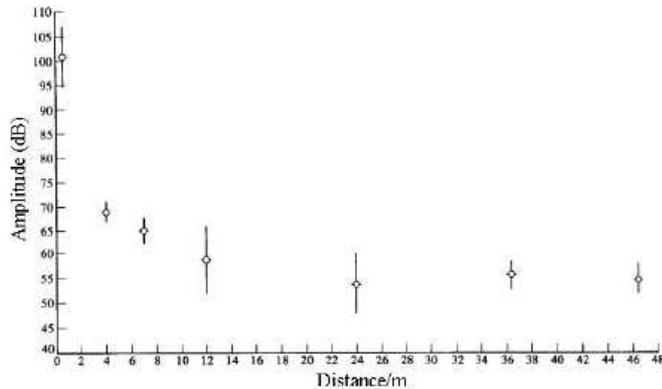
Application de l'émission acoustique à l'auscultation:



4- Propagation d'ondes
4.3- Emission acoustique

Domaines d'application

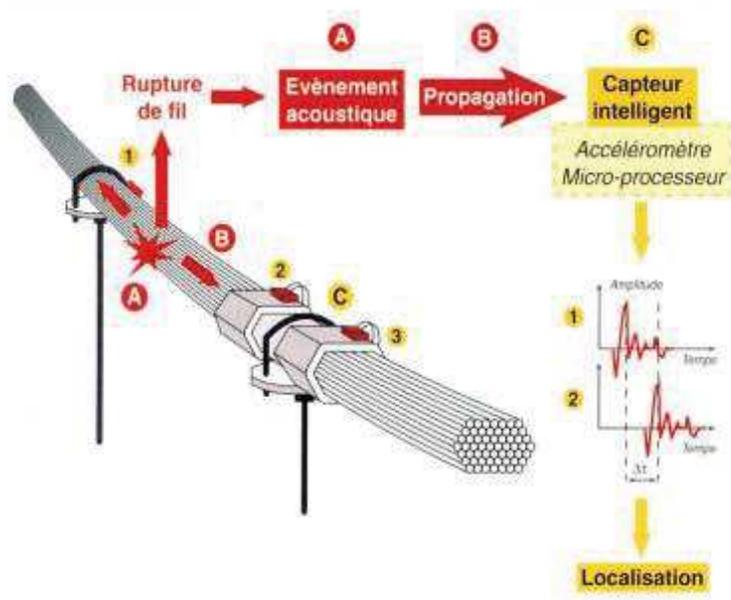
Application de l'émission acoustique à l'auscultation:
Rupture de câble



4- Propagation d'ondes
4.3- Emission acoustique

Domaines d'application

Application de l'émission acoustique à l'auscultation:
Rupture de câble

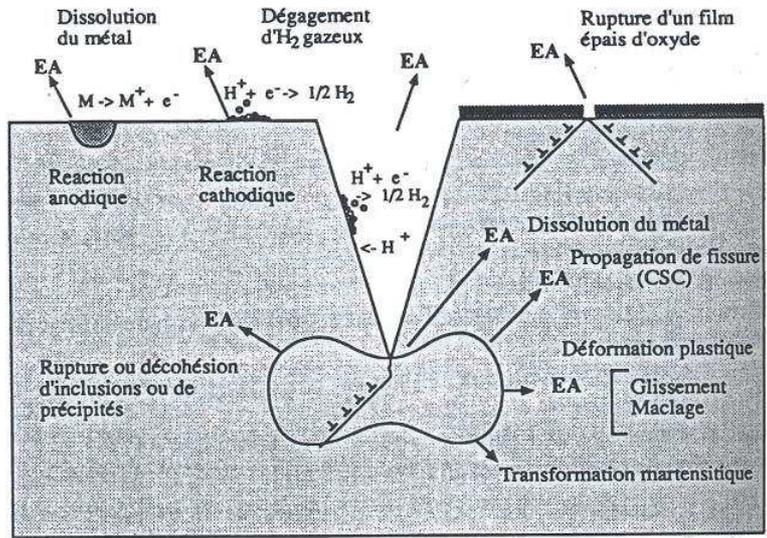


4- Propagation d'ondes

4.3- Emission acoustique

Domaines d'application

Application de l'émission acoustique à l'auscultation:
Corrosion



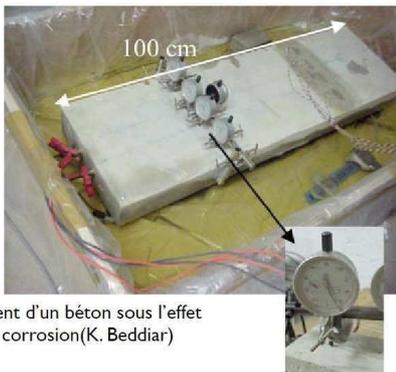
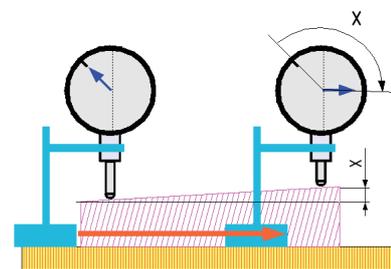
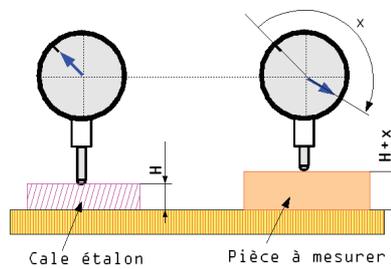
5- Déplacements

5.1- Comparateur

- Principe:
 - Mesure relative
 - Cale étalon
- Utilisation:
 - Ecart de parallélisme
 - Déformation de matériaux



10⁻³ mm

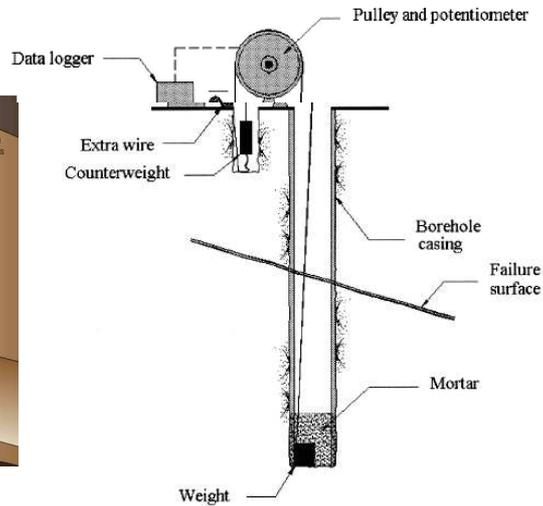
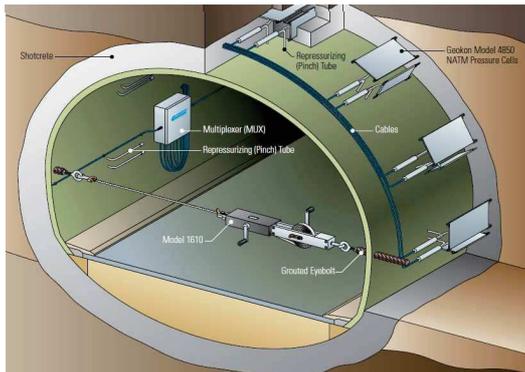


gonflement d'un béton sous l'effet de la corrosion (K. Beddiar)

5- Déplacements

5.2- Extensomètre

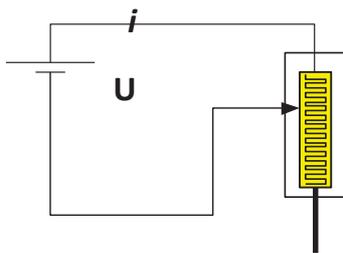
- Fil/Ruban



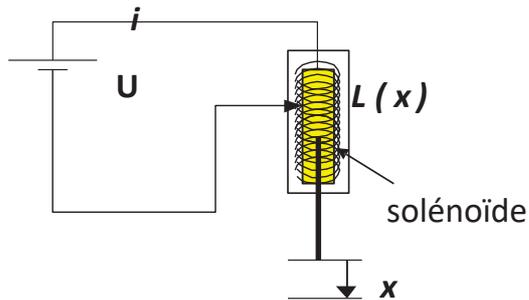
5- Déplacements

5.1- LVDT

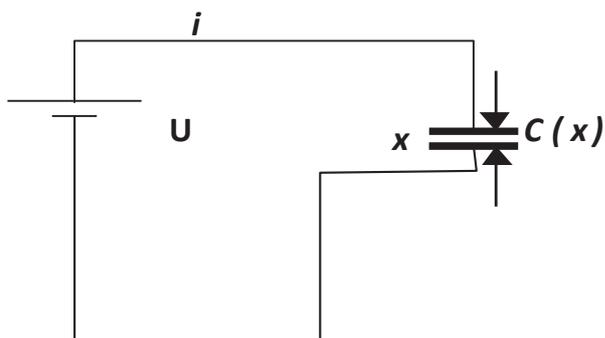
- Les capteurs électriques



Capteurs résistifs : I



Capteurs inductifs : fq



Capteurs capacitifs : fq

Variation
de l'impédance

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$



Modification
de la tension

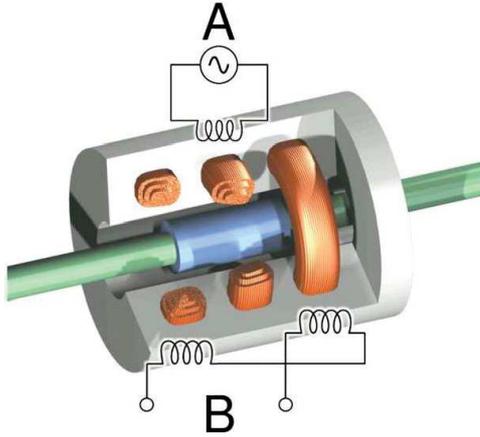
$$u = Z \cdot i$$

5- Déplacements

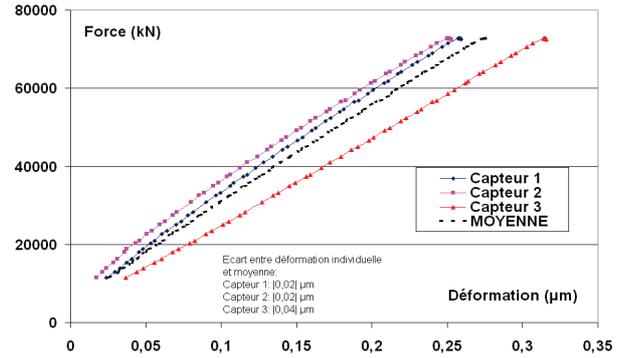
5.3- LVDT

- Principe:
 - 1 Transformateur: 3 bobines
 - 1 noyau ferromagnétique

*Capteur électrique passif (inductif)
de déplacements linaires*



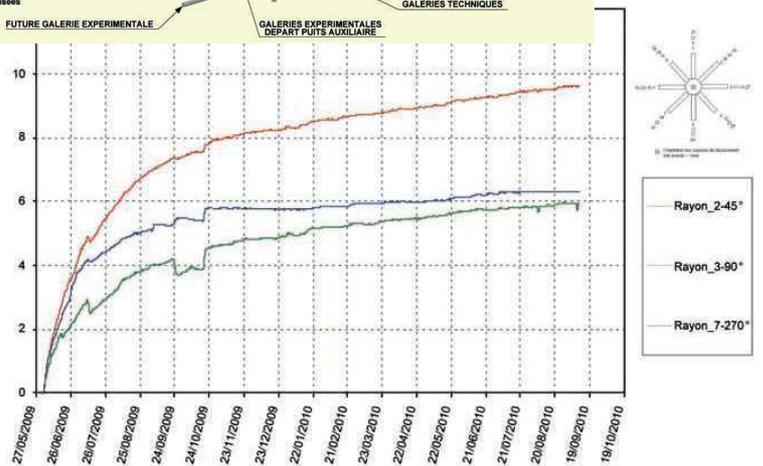
Exemple:



5- Déplacements

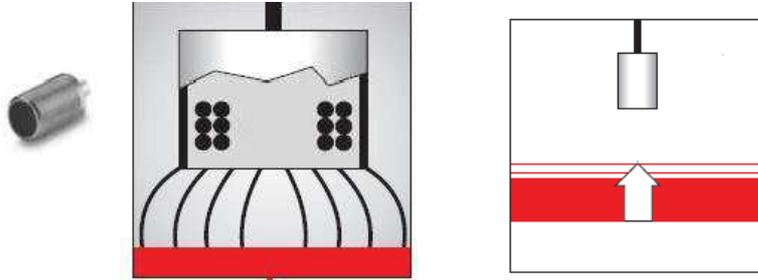
5.3- LVDT

Exemple:



5- Déplacements
5.4- Sans contact

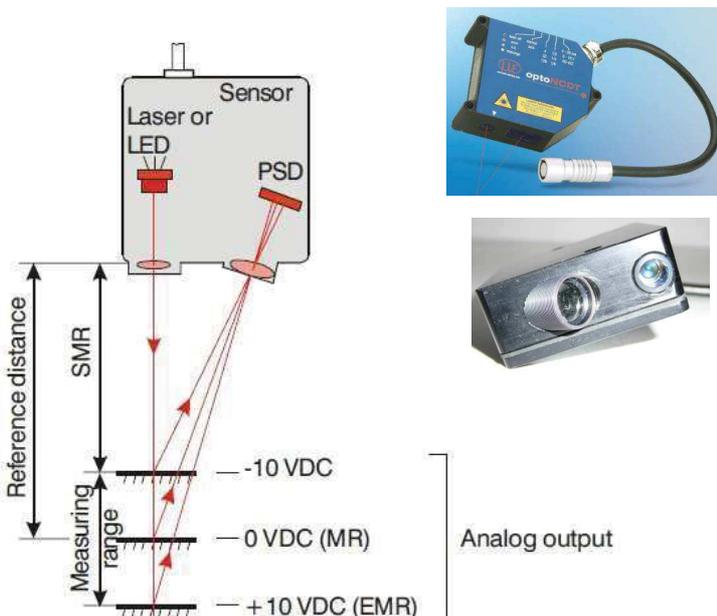
- Quelques exemples:
 - Capteur à courant de Foucault



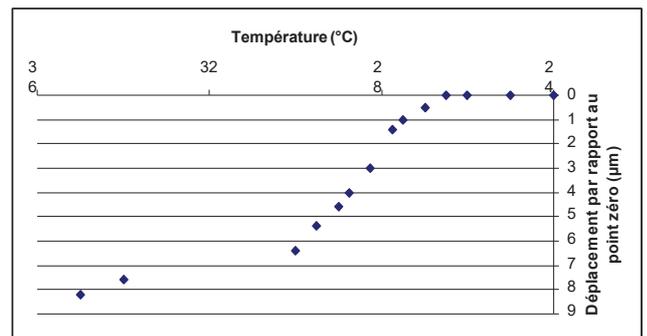
-Matériaux à conductivité électrique
-Bonne stabilité thermique
-Utilisation dans environnement difficile

5- Déplacements
5.4- Sans contact

- Quelques exemples:
 - Capteur à triangulation Laser



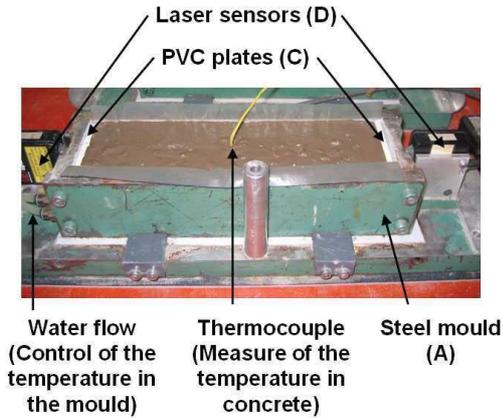
Type de matériau	Intensité de la lumière réfléchie (Volt)
Miroir	<1
Mica	<1
Béton	<1
Bois	<1
Plastique blanc	Diffusion du signal dans la matière
Teflon	Diffusion du signal dans la matière
Acier poli au papier de vert	5.3
Aluminium laqué	6.82



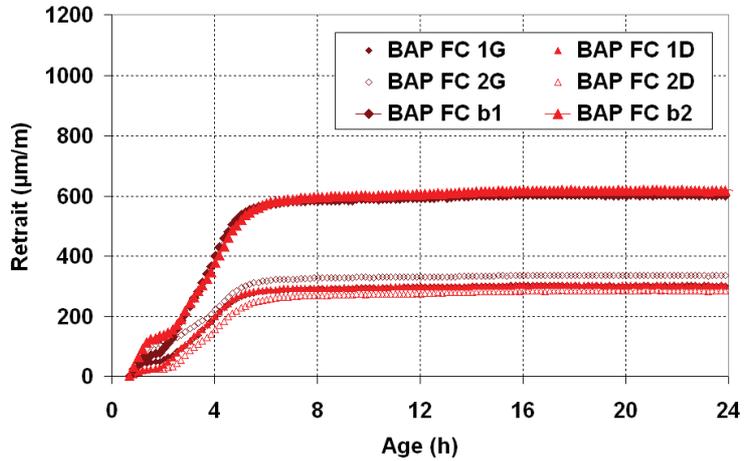
5- Déplacements

5.4- Sans contact

- Quelques exemples:
 - Capteur à triangulation Laser

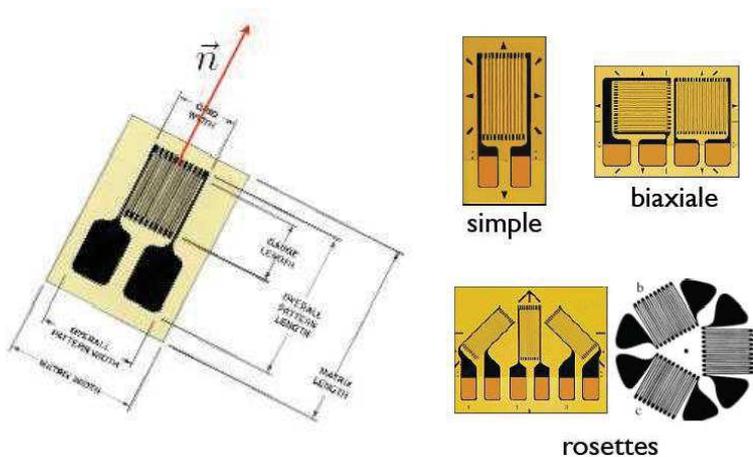


[SEDIBET]

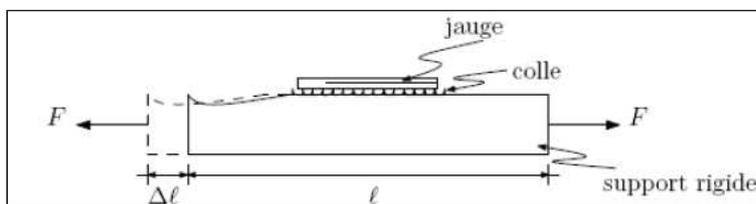


6- Déformation: Mesure locale

Jauge métallique



+ Paramètres de sensibilité de la jauge



6- Déformation: Mesure locale

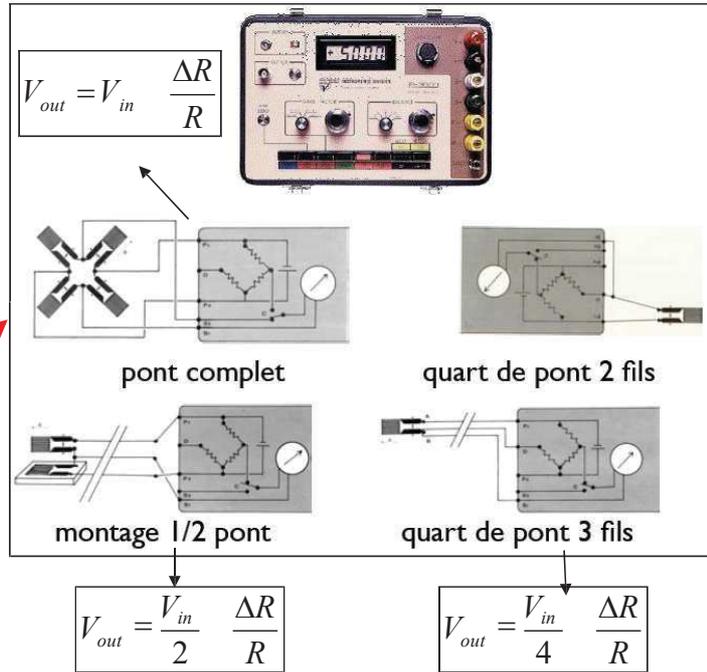
Montage

Exemple:

Si $R = 120 \Omega$, $K = 2$ et
 $\epsilon = 1 \mu\text{m/m}$

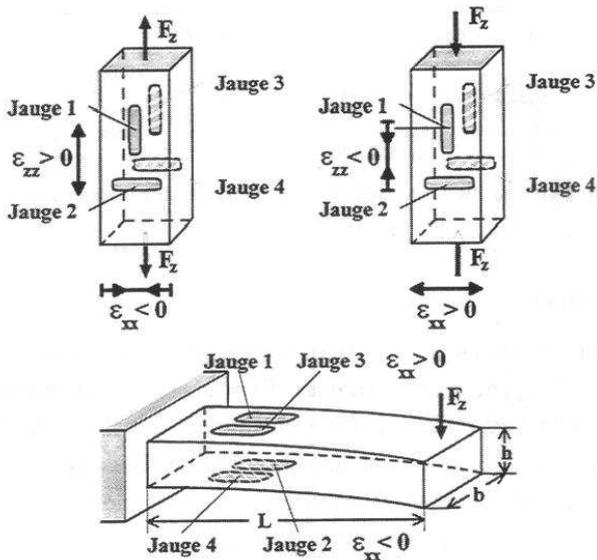
$\rightarrow dR = 240 \mu\Omega$

Solution : Pont de
 Wheastone



6- Déformation: Mesure locale

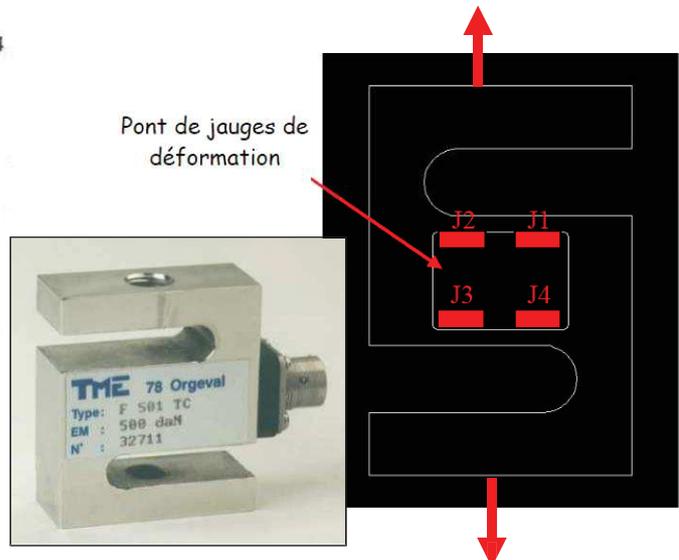
Montage : exemples



$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{2} (\epsilon_l - \epsilon_t) = \frac{k}{2} (1 + \nu) \epsilon_l$$

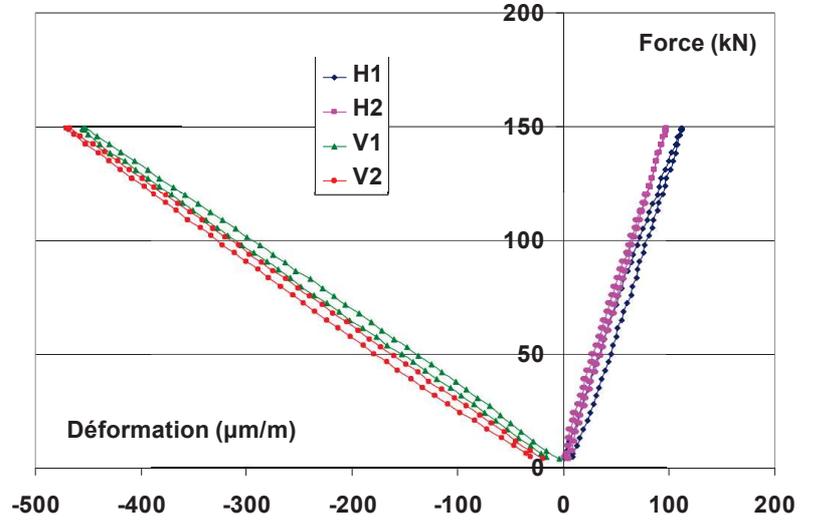
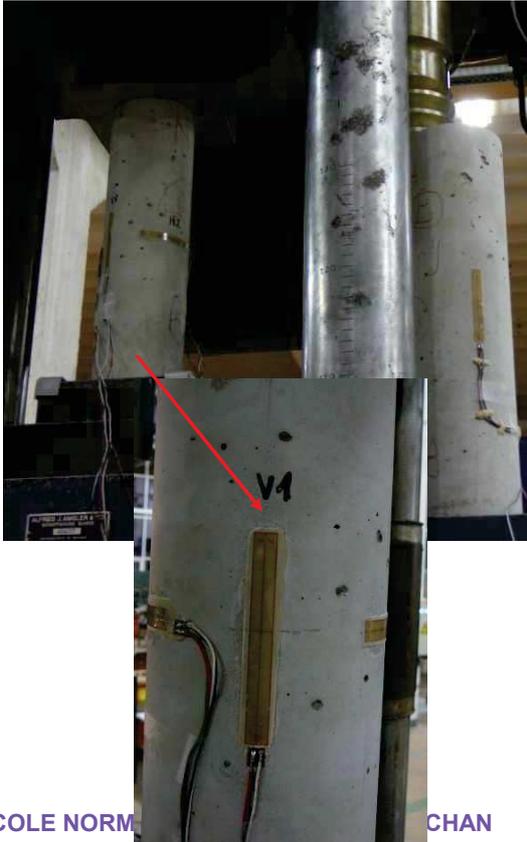
$$\frac{U_A}{U_E} = k \epsilon_l$$

Capteur de force



6- Déformation: Mesure locale

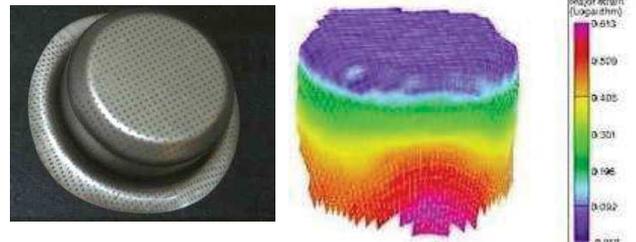
Essai de compression



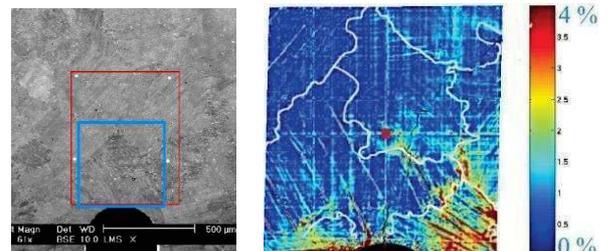
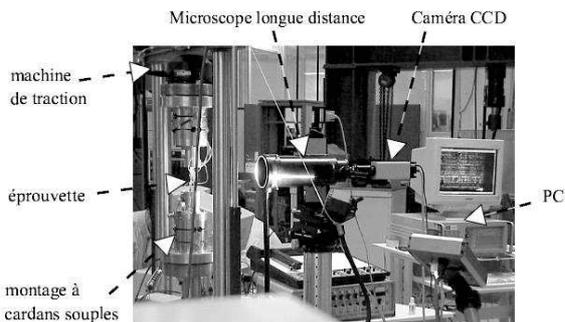
7- Corrélation d'images: Mesure de champs



Mesure globale



Mesure locale

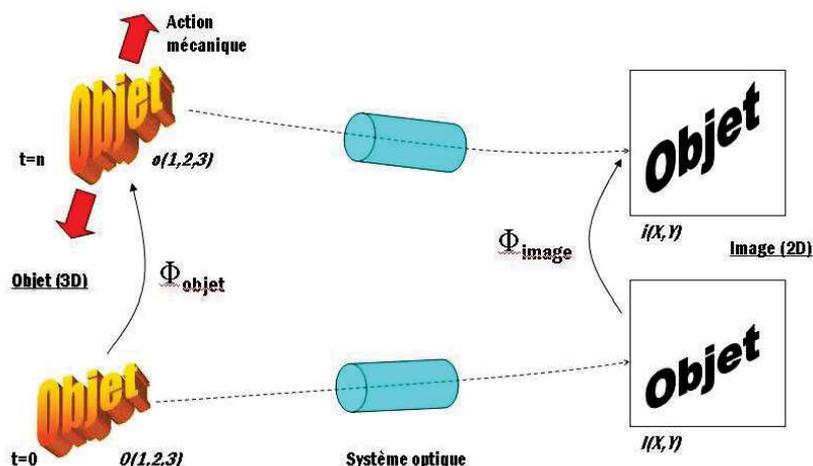




7- Corrélation d'images: Mesure de champs

Qu'est ce que la corrélation d'image?

La transformation objet en image:



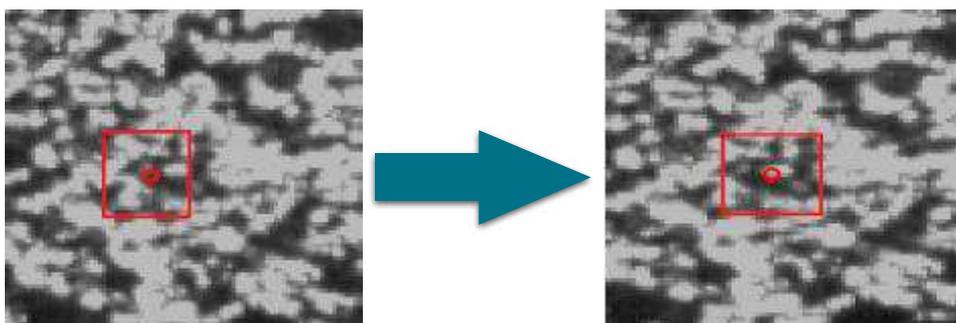
Capture d'une image (2D) pour interprétation déformation objet (3D)

Φ_{objet} et Φ_{image} confondus



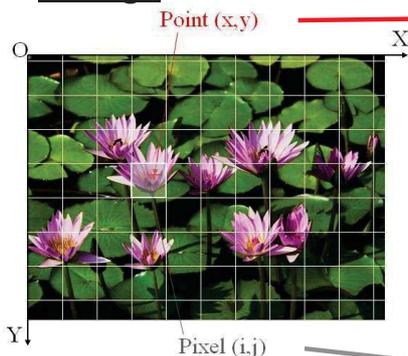
7- Corrélation d'images: Mesure de champs

Comparaison de deux images: Suivi de pixel



Correspondance d'un pixel de la 1^{ère} image dans la 2^{ème}, en mesurant leur ressemblance par calcul d'un score de corrélation déterminé sur leur voisinage

L'image



$f(x,y)$ = niveau de signal au point (x,y) du plan objet (arguments réels)

Trame de Pixels:

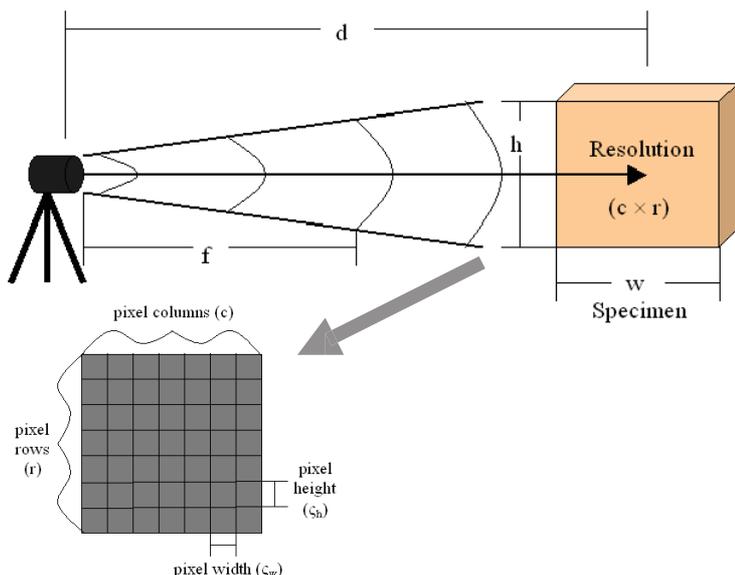
- Utiliser une trame carrée régulière (rapport de forme équivalent dans les deux directions)
- Unité de distance = f(taille pixel)
- Unité de signal en « niveau de gris »

$f(i,j)$ = valeur fournie par le système de numérisation au pixel (i,j) (arguments entiers)

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

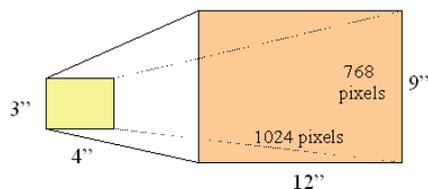
- Quelques paramètres :

Résultats = $f(c, r, w, h, d, f + \text{application du mouchetis})$



$$\zeta_w = \frac{w}{c} \quad \& \quad \zeta_h = \frac{h}{r} \quad [\text{Cintron et al 2008}]$$

Exemple : Résolution



$$\zeta_w = \frac{w}{c} = \frac{12}{1024} = 0,012 \text{ inch / pixel}$$

$$\zeta_h = \frac{h}{r} = \frac{9}{768} = 0,012 \text{ inch / pixel}$$

école normale supérieure paris-saclay

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

- Contraste d'image : Motif aléatoire \rightarrow Aspect « moucheté »
But: Identification de chaque point de la surface dans chaque image

1. Peinture mouchetée (éclairage à la lumière blanche)

Difficultés :

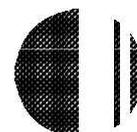
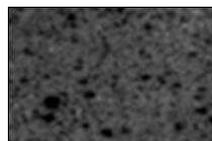
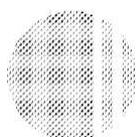
- Peinture mat pour éviter les reflets
- Détachement peinture si déformation élevée
- Pas toujours possible (humidité, température)
- Dissimulation de la microstructure

Avantages :

- Très facile à mettre en œuvre
- Très bon contraste et uniforme (si bien réalisé)

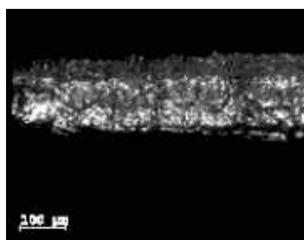
Tâches noires sur fond blanc

Tâches blanches sur fond noir



2. Contraste naturel (s'il existe à une échelle compatible):

- Polymère biphasé
- Matériaux attaqués chimiquement
- Roche



acier

école normale supérieure paris-saclay



7- Corrélation d'images: Mesure de champs

Cas de certaines matières plastiques

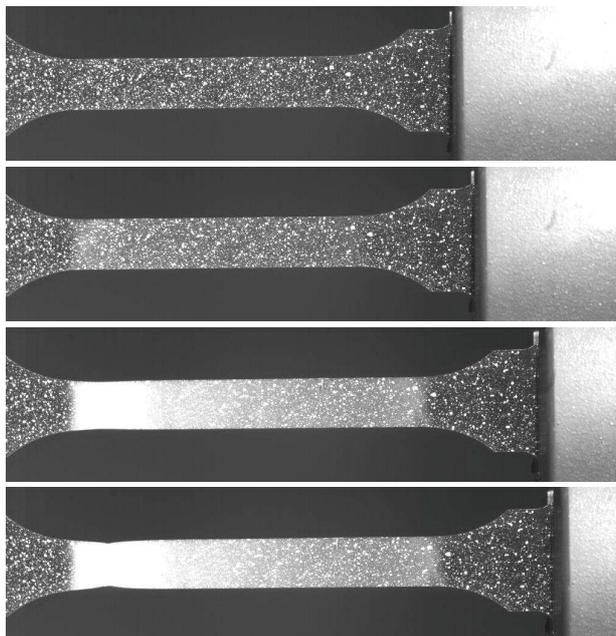
Exemple 1 – Matière PHC3181, dépôt direct de mouchetis noir

Avant essai

En cours d'essai

Modification de l'aspect de la surface rendant l'appariement temporel impossible

A rupture



7- Corrélation d'images: Mesure de champs

Cas de certaines matières plastiques

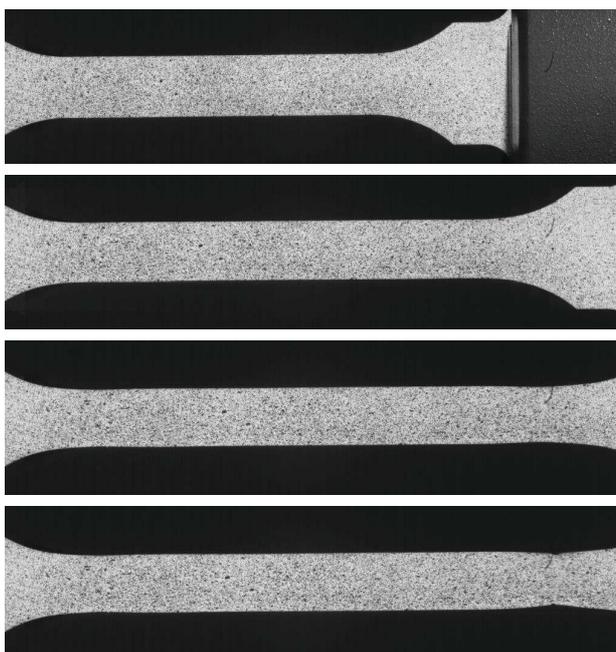
Exemple 1 – Matière PHC3181, dépôt de mouchetis noir sur substrat blanc

Avant essai

En cours d'essai

Appariement temporel possible

A rupture



7- Corrélation d'images: Mesure de champs

Exemple : Motif du moucheti

Forme et taille du mouchetis noir

Efficacité = f(quantité de pixel par tâche noire)

→ Bon mouchetis : 10 pixels (petit), 20 pixels (moyen) et 30 pixels (large)

Dimensions d'un point noir (ζ)

$$\zeta_w = \frac{w}{c} = \frac{12}{1024} = 0,012 \text{ inch / pixel}$$

$$\zeta_h = \frac{h}{r} = \frac{9}{768} = 0,012 \text{ inch / pixel}$$

$$\zeta = p \zeta = 10 \text{ pixels} \quad 0,012 = 0,12 \text{ inch}$$

$$\zeta = p \zeta = 30 \text{ pixels} \quad 0,012 = 0,36 \text{ inch}$$

Autres paramètres: distance focale, Effets de distorsion...

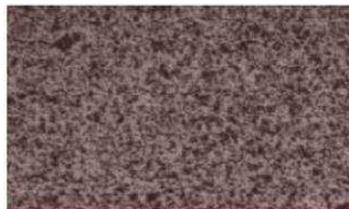


Figure 1.9: A good speckle pattern

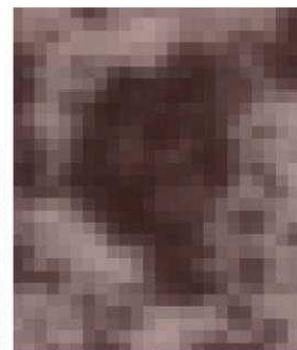
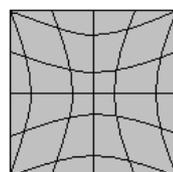
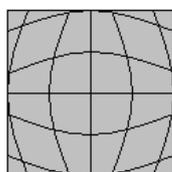


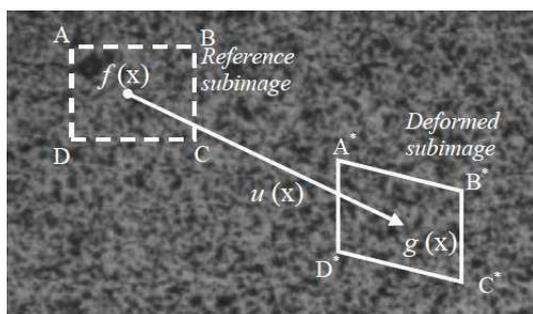
Figure 1.10: A medium black speckle zoomed. The black speckle has approximately 15 pixels wide and 20 pixels high.



Distorsion en barillet Distorsion en croissant

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

Principe de conservation du flux optique



$f(\underline{x})$ = niveau de gris dans image de référence

$g(\underline{X})$ = niveau de gris dans image déformée

$\underline{X} = \Phi(\underline{x})$: transformation mécanique (apparente)

$$g(\Phi(\underline{x})) = f(\underline{x})$$

$$g(\Phi(\underline{x})) = f(\underline{x}) + \eta$$

$$g(\Phi(\underline{x})) = a f(\underline{x}) + b + \eta$$

Problème inverse mal posé → Résolution par approximation

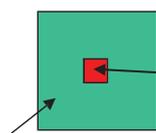
Coefficient de corrélation :

$$C(\Phi) = \int_D [f(\underline{u}) - g(\Phi(\underline{u}))]^2 du$$

Somme des différences au carré

Si $\Phi = \Phi_0$, alors $C(\Phi_0) = 0$, sinon $C(\Phi_0) \geq 0$

La minimisation de $C(\Phi_0)$ par rapport aux paramètres caractérisant Φ_0 conduit à une estimation de Φ sur D



point \underline{x}_0

D = voisinage de \underline{x}_0

= domaine de corrélation



7- Corrélation d'images: Mesure de champs

- Principe de conservation du flux optique

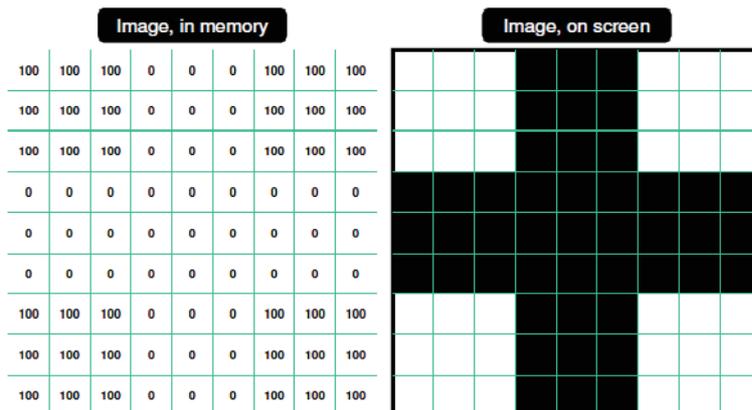
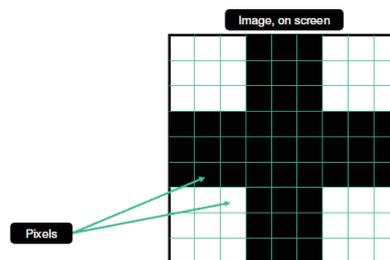
– Illustration de la problématique:

- Acquisition d'images à 9 x 9 Pixels

Exemple:

-Pixel blanc: Niveau de gris 100

-Pixel noir : Niveau de gris 0



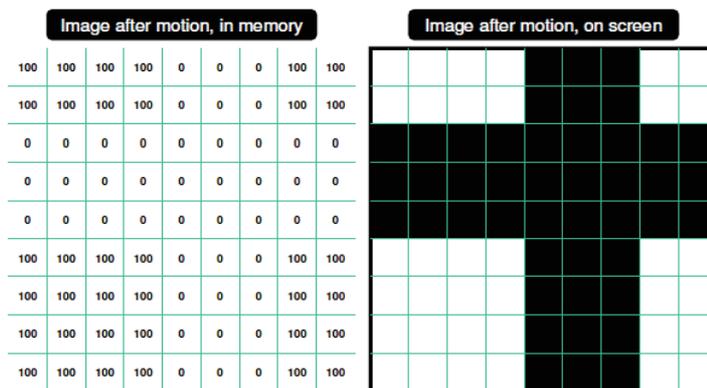
Une image est une matrice d'entiers

école normale supérieure paris-saclay



7- Corrélation d'images: Mesure de champs

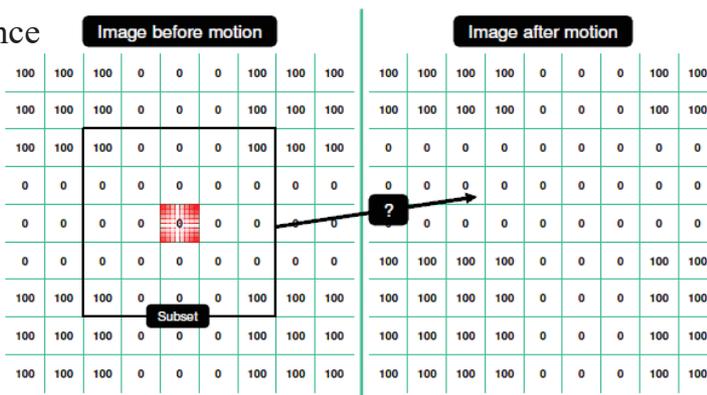
- L'objet bouge tel que l'image bouge d'un pixel en haut et à droite



Exemple: Image de référence

= Sous-ensemble 5x5

Où se situe le sous-ensemble ayant été déplacé?



école normale supérieure paris-saclay

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

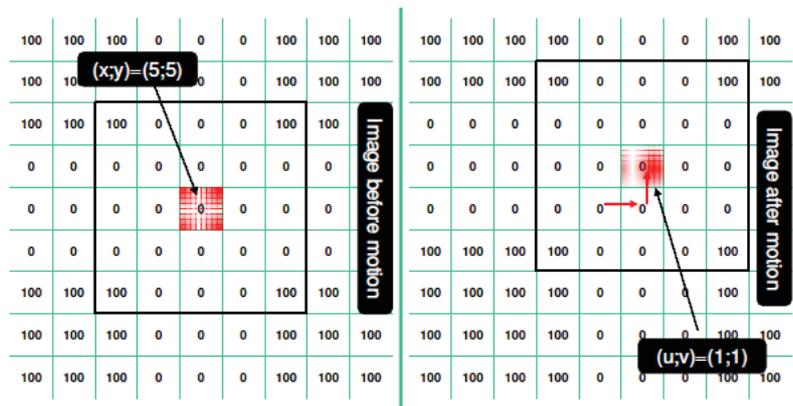
- Solution** : Déterminer les différentes configurations possibles et les classer à l'aide de la fonction de corrélation
- Fonction de corrélation classique**: la somme des différences au carré des valeurs des pixels → Minimisation

Exemple : Déplacement potentiel $(u,v) = (-2,-2)$



7- Corrélation d'images: Mesure de champs

- Exemple:
Déplacement potentiel $(u,v) = (1,1)$



MAIS en général, l'image est corrompue par du bruit



→ La fonction C n'est jamais nulle

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

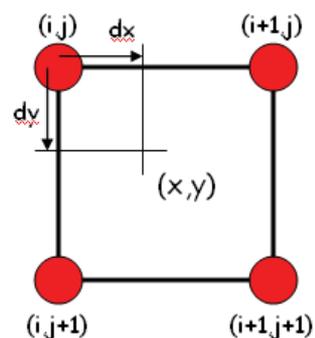
– Autre problématique: Interpolation des images

- L'échantillon se déplace tel que l'image bouge de 0,5 pixel à droite



Interpolation de l'image sur non-entiers

$$(i=E(x), j=E(y))$$



Évaluer $g(x,y)$ pour (x,y) non entiers ?

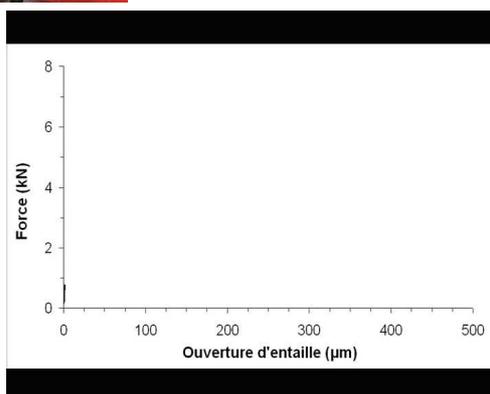
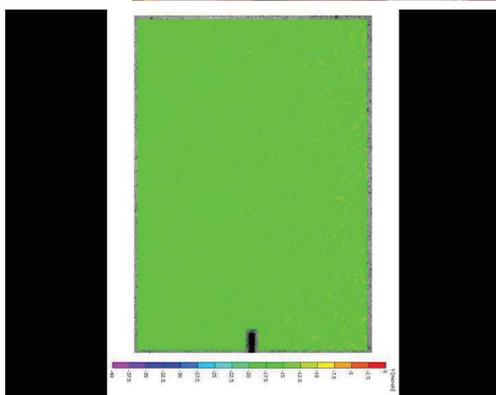
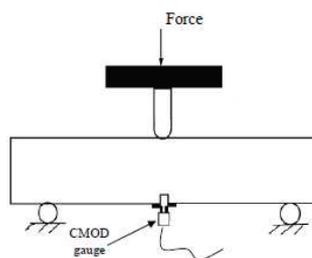
Plus proche voisin: $g(x,y) \cong gE(x+1/2)E(y+1/2)$

Corrélation au pixel près pour mouvement quelconque

école normale supérieure paris-saclay

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

- **Exemple : Ouverture de fissure**



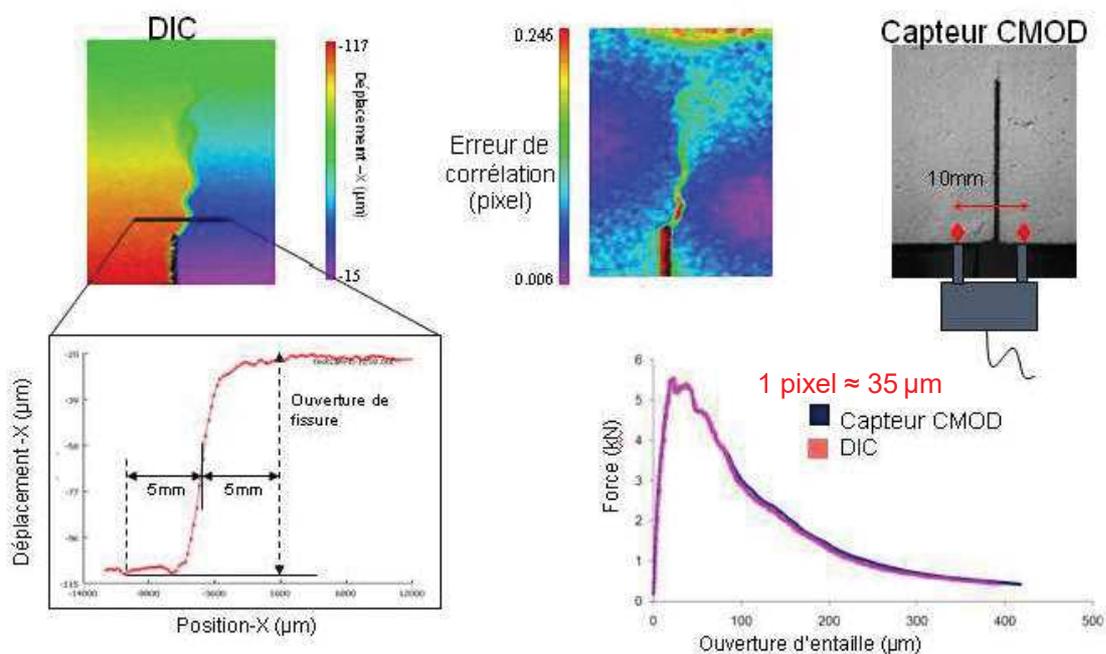
[Alam 2011]

école normale supérieure paris-saclay

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

- Exemple : Ouverture de fissure**

Mesure de l'ouverture de fissure



7- Corrélation d'images: Mesure de champs

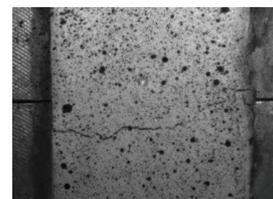
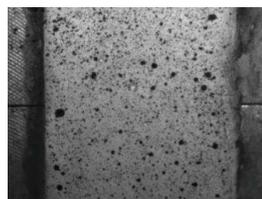
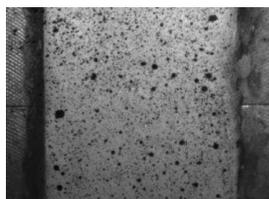
- Exemple : Essai de traction au jeune âge**



Fissuration radier



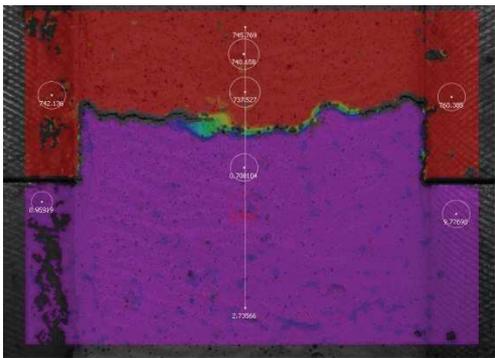
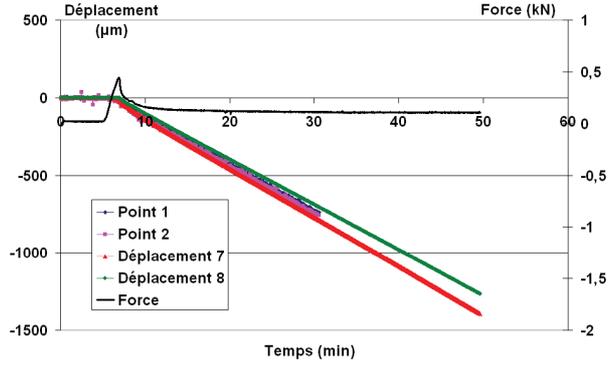
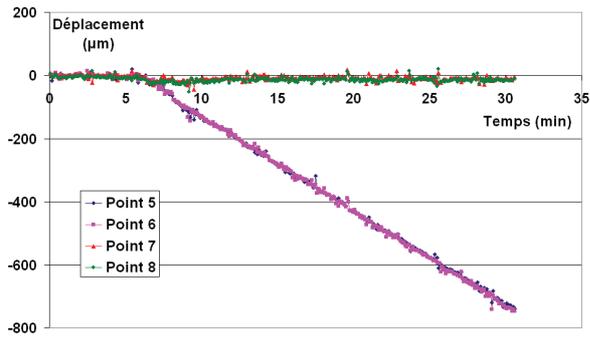
Evolution de la capacité de déformation





7- Corrélation d'images: Mesure de champs

Exemple : Essai de traction au jeune âge



7- Corrélation d'images: Mesure de champs

Exemple : Essai de traction sur alliage d'aluminium



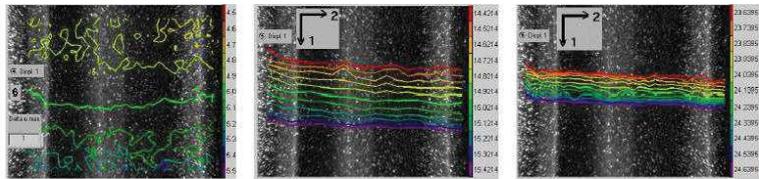
Alignement

3,6 kN

18,8 kN

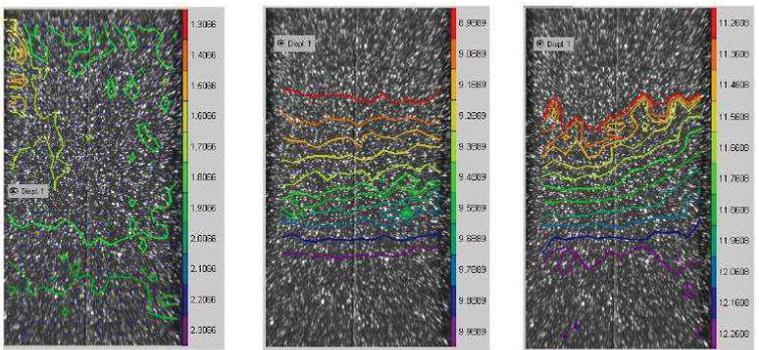
32 kN

8 bits
256



-a-

10,5 bits



Déplacement dans la direction de sollicitation

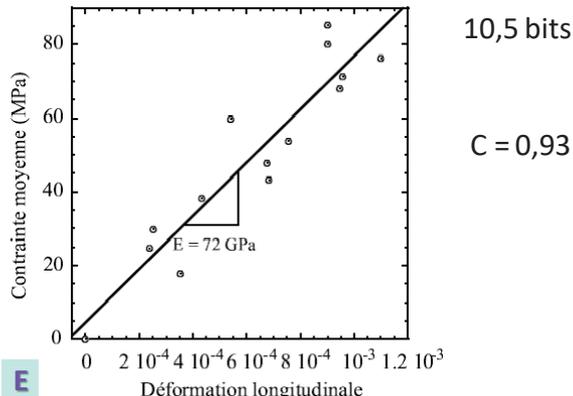
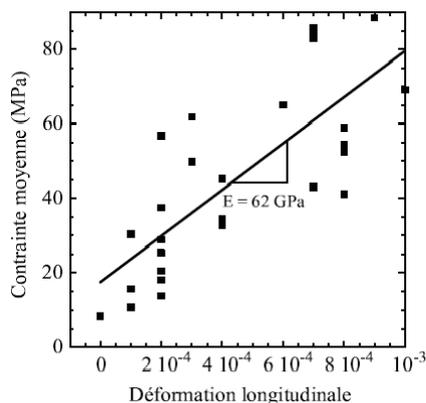
[Hild 2003]

65 536 couleurs : 16 bits

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

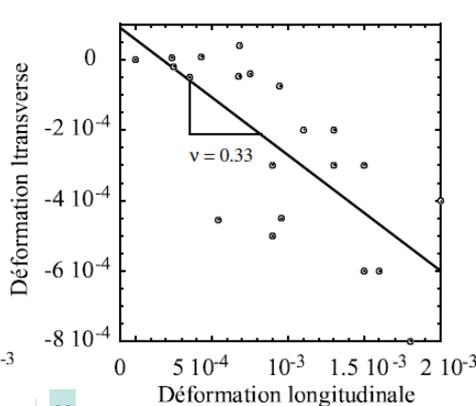
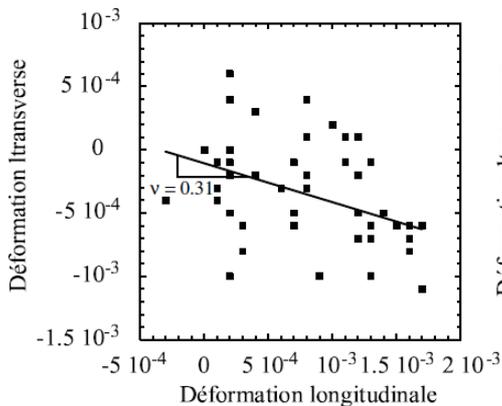
Exemple : Essai de traction sur alliage d'aluminium

8 bits
C = 0,77



10,5 bits
C = 0,93

C = 0,42



C = 0,73

ÉCOLE NC

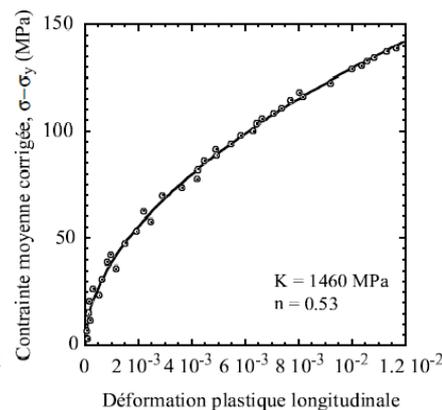
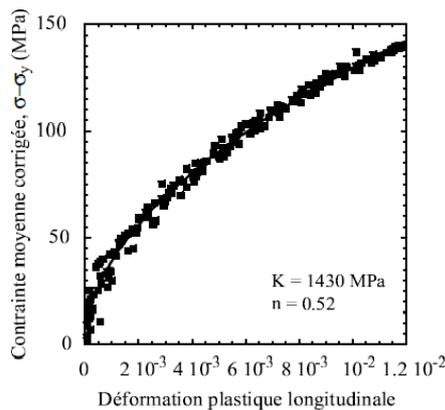
école normale supérieure paris-saclay

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

Exemple : Essai de traction sur alliage d'aluminium

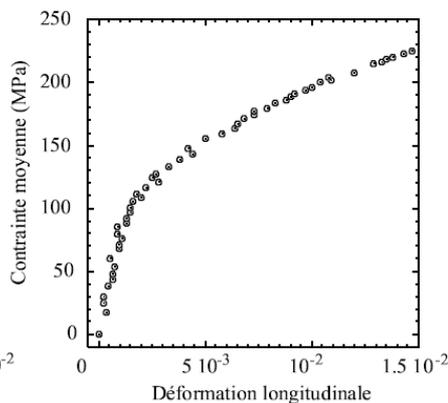
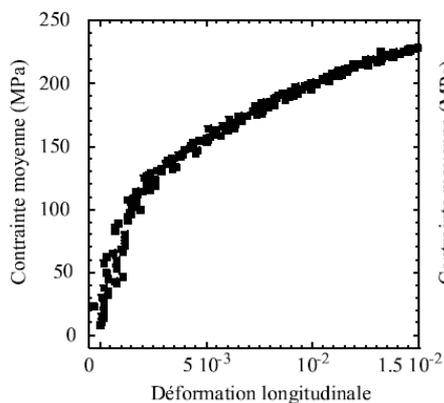
Déformation plastique

8 bits
C = 0,995



0,998

Courbe de traction

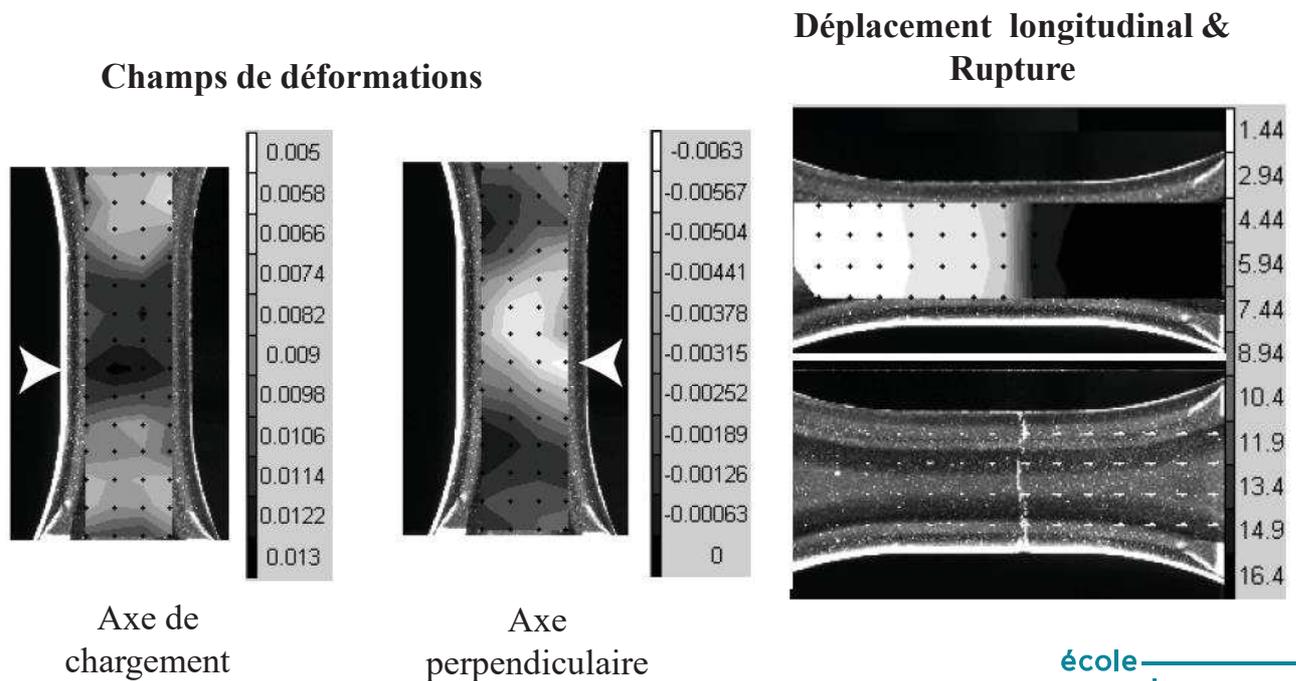


ÉCOLE NORMALI

école normale supérieure paris-saclay

7- Corrélation d'images: Mesure de champs

- **Exemple : Essai de traction sur alliage d'aluminium**



7- Corrélation d'images: Mesure de champs

- **Globalement :**

- Nombreux avantages:
 - Facilité de préparation de la surface de l'objet
 - Densité de l'information obtenue
 - Choix du pas de la grille virtuelle pour calcul des déformations
 - Post-traitement adaptable
- Quelques inconvénients...
 - Limitation à des déformations planes
 - Parallélisme des plans
 - Distance constantes entre la caméra et l'objet

*Stéréo-corrélation / Association avec la tomographie
=Méthode de mesure de champs cinématiques sans contact combinant
l'extensométrie bidimensionnelle et la stéréovision*