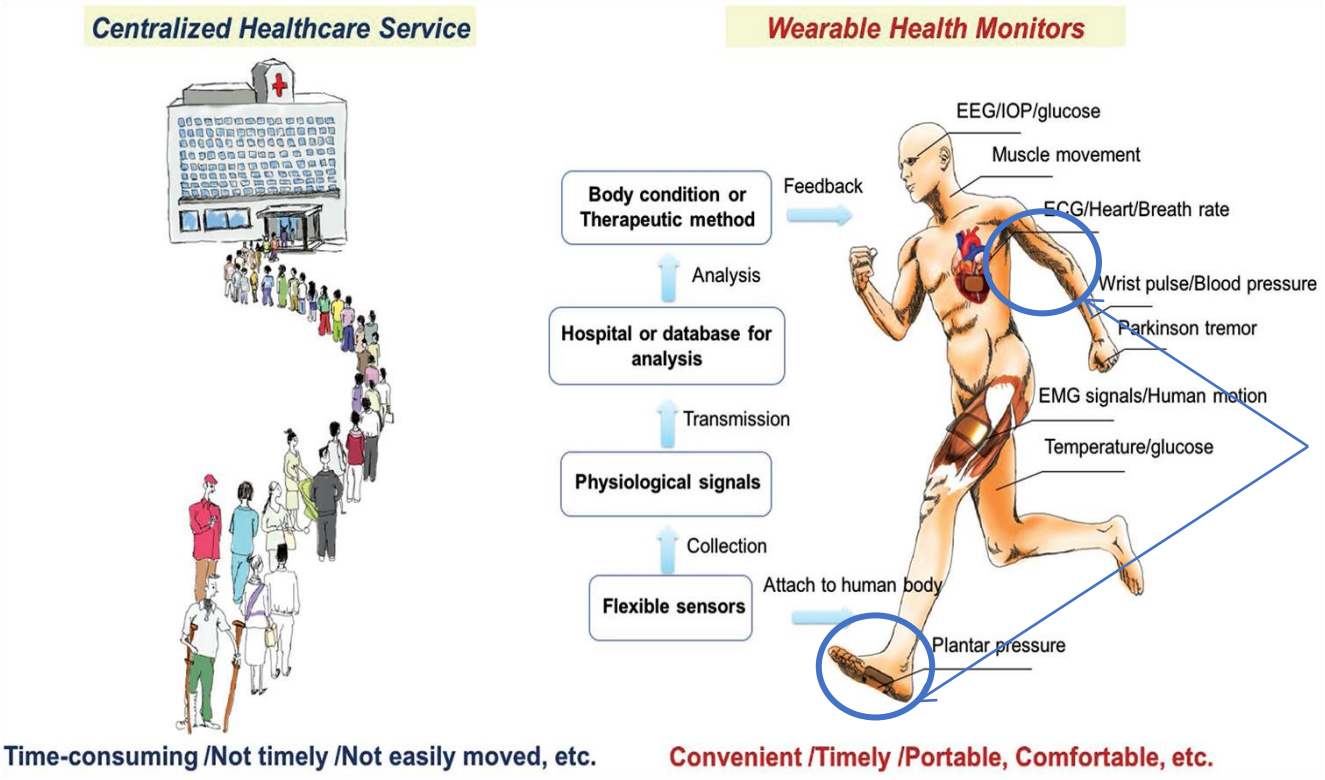
Capteurs de pression flexibles à base de PDMS poreux

Sylvie BILENT, Thi-Hong-Nhung DINH
Emile MARTINCIC, Pierre-Yves JOUBERT

Dispositifs flexibles à base de polymère pour le diagnostic médical

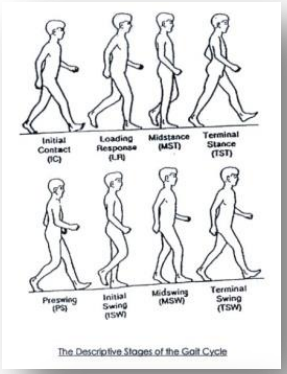


Micro capteurs de champ de pression capacitifs

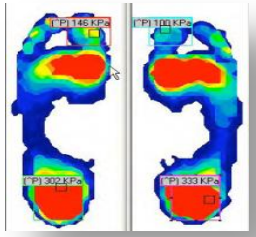
[S. Wang, et al. *Trends Biotechnol.*, 2016]

Capteurs souples
… pour applications médicales

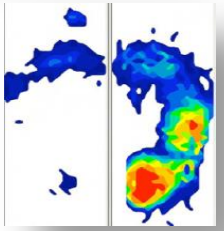
Analyse de la marche en extérieur
(sport, rééducation…)



Surveillance quotidienne des cartes de pression plantaire
(maladie neurodégénérative)



Champs de pression équilibrés



Champs de pression déséquilibrés

Surveillance des traitements de compression
(trouble veineux chronique)

Plan

- Introduction
- Capteurs souples capacitifs de pression
- Fabrication et caractérisation de PDMS poreux
- Caractérisation électromécanique
- Conclusion et perspectives

Capteurs souples capacitifs de pression

Uniforme, structuré ou poreux?

PDMS : **P**oly**D**i**M**éthyl**S**iloxane

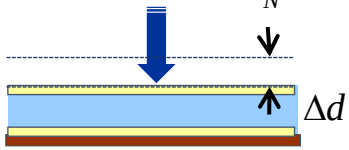
Film de PDMS **uniforme**

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0}$$

Surface des électrodes

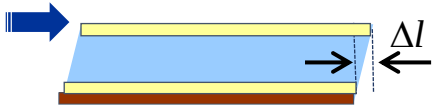
Epaisseur de PDMS

Force normale F_N



$\Delta C_{N\%} \sim \Delta d \sim F_N$

Force cisaillement F_C



$\Delta C_{C\%} \sim \Delta l \sim F_C$

Capteurs souples capacitifs de pression

Uniforme, structuré ou poreux?

PDMS : Poly**D**i**M**éthyl**S**iloxane

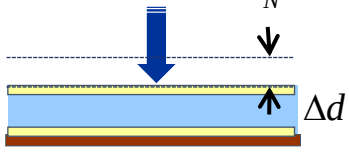
Film de PDMS **uniforme**

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0}$$

Surface des électrodes

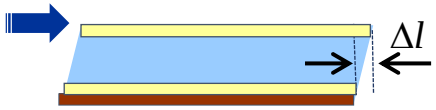
Epaisseur de PDMS

Force normale F_N



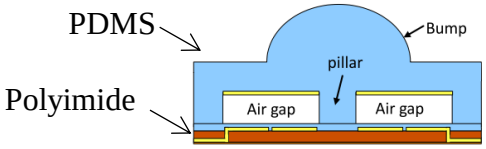
$$\Delta C_{N\%} \sim \Delta d \sim F_N$$

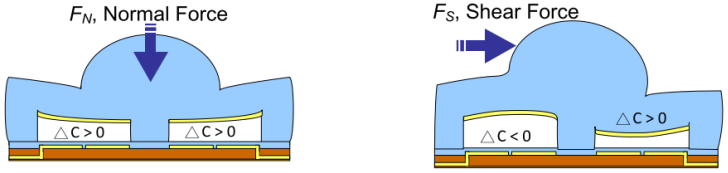
Force cisaillement F_C



$$\Delta C_{C\%} \sim \Delta l \sim F_C$$

Film de PDMS **structuré**





(Cheng *et al.*, 2010)

Capteurs souples capacitifs de pression

Uniforme, structuré ou poreux?

PDMS : Poly**D**i**M**éthyl**S**iloxane

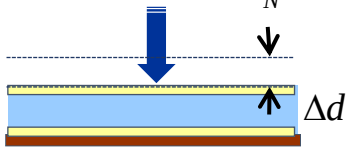
Film de PDMS **uniforme**

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_0}$$

S : Surface des électrodes

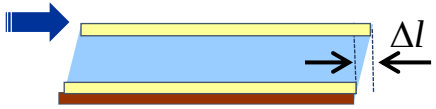
d_0 : Epaisseur de PDMS

Force normale F_N



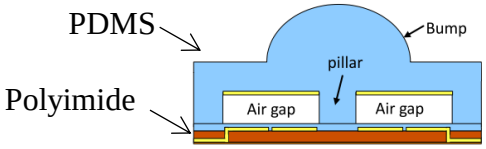
$\Delta C_{N\%} \sim \Delta d \sim F_N$

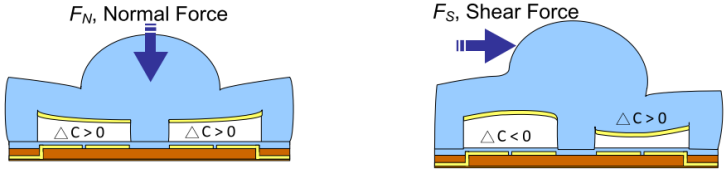
Force cisaillement F_C



$\Delta C_{C\%} \sim \Delta l \sim F_C$

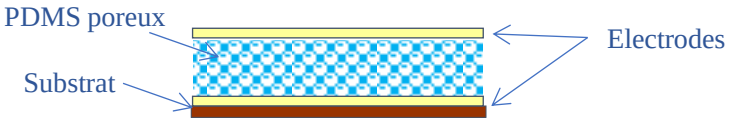
Film de PDMS **structuré**



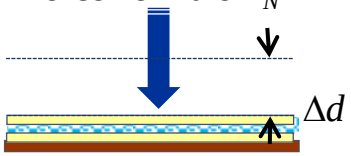


(Cheng *et al.*, 2010)

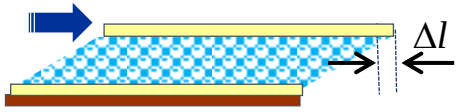
Film de PDMS **poreux**



Force normale F_N

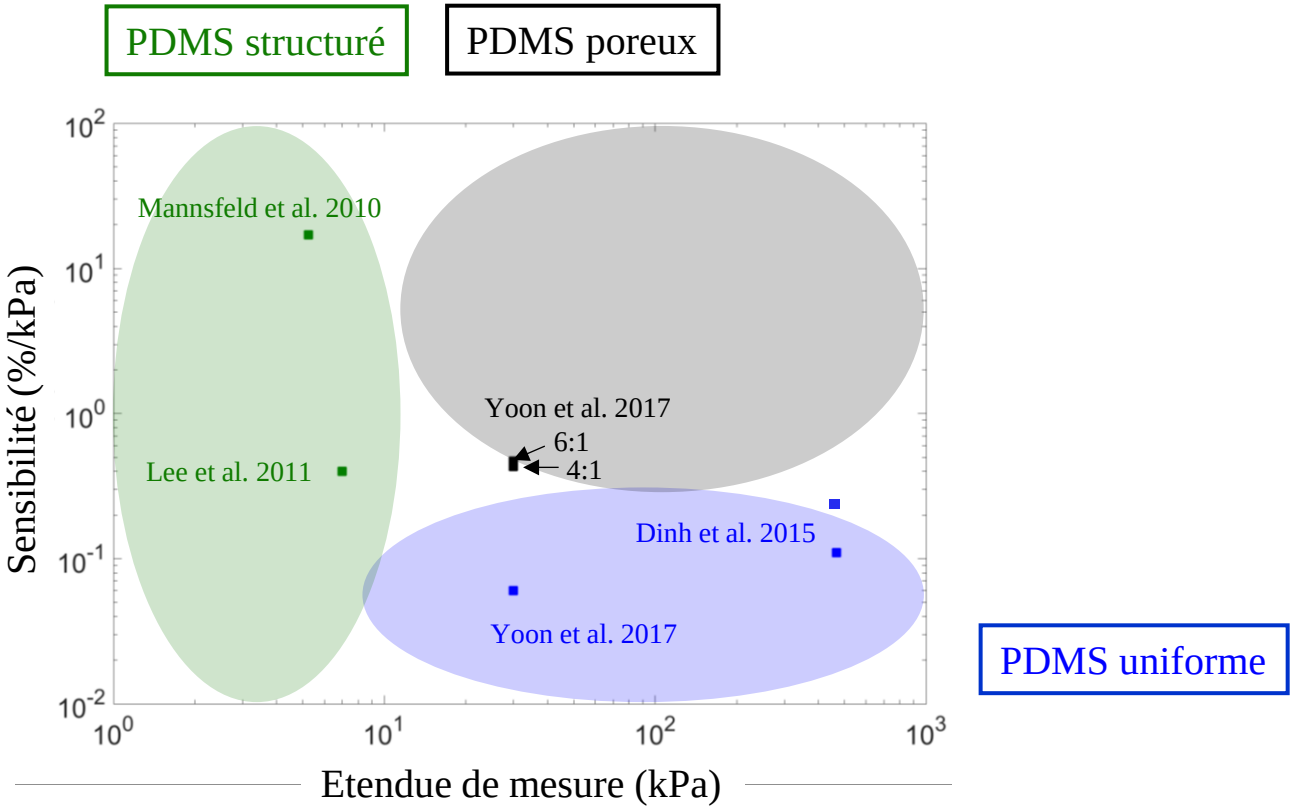


Force cisaillement F_C



Etendue de mesure/Sensibilité

Carte de performances des capteurs de pression de PDMS



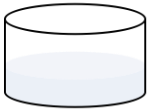
Plan

- Introduction
- Capteurs souples capacitifs de pression
- Fabrication et caractérisation de PDMS poreux
- Caractérisation électromécanique
- Conclusion et perspectives

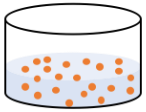
Fabrication du PDMS poreux

Mousse de PDMS / PDMS poreux : concept inspiré de Yoon et al., 2017

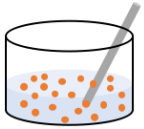
1) Préparer le PDMS (1:10)



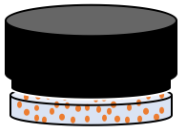
2) Ajouter le sucre (4:1 et 6:1)



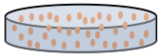
3) Mélanger le sucre avec le PDMS



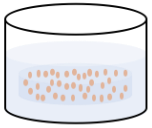
4) Comprimer le mélange



5) Cuire le mélange (90°C pendant 2h)



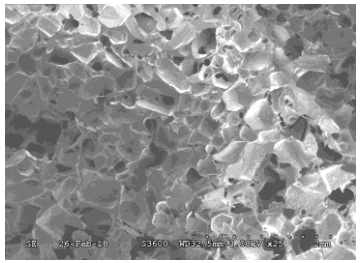
6) Dissoudre le sucre



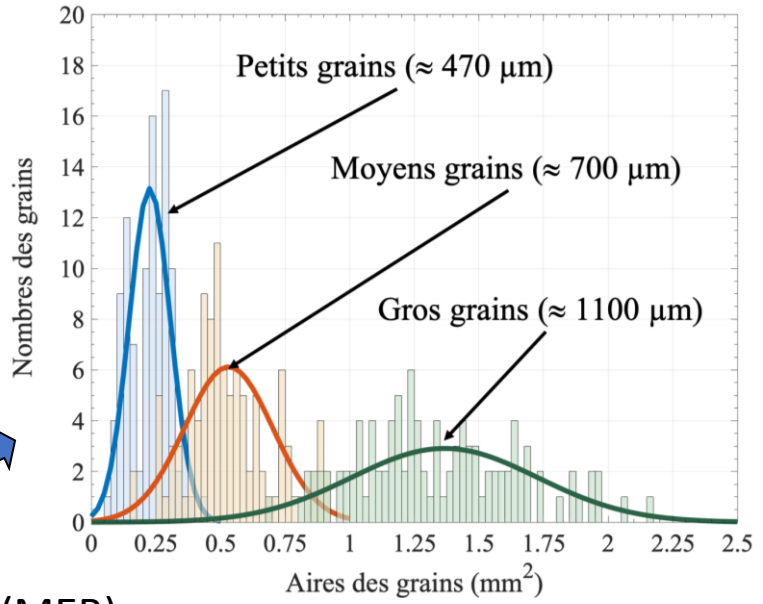
7) Sécher le PDMS poreux (75° C pendant 1h)

Contrôle de la taille des pores

Microscopie optique



Distribution des tailles



Microscopie électronique à balayage (MEB)

Propriétés du PDMS poreux

Porosité

$$f = 1 - \frac{\rho_{poreux}}{\rho_{uniforme}}$$

Ratio volumique (sucre : PDMS)	Taille des pores	Porosité (%)
4:1	Petit	78.58 ± 3.11
	Moyen	79.76 ± 1.42
	Gros	81.22 ± 0.97
	Moyenne	**79.85 ± 1.83**
6:1	Petit	82.84 ± 1.28
	Moyen	85.18 ± 0.85
	Gros	85.02 ± 1.08
	Moyenne	**84.35 ± 1.07**

Propriétés du PDMS poreux

Porosité

$$f = 1 - \frac{\rho_{foam}}{\rho_{bulk}}$$

Permittivité théorique

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{air} f + (1 - f)\varepsilon_{PDMS}$$

Permittivité mesurée

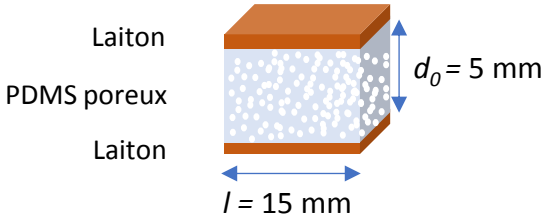
$$\varepsilon_r = \frac{C\,d}{\varepsilon_0 S}$$

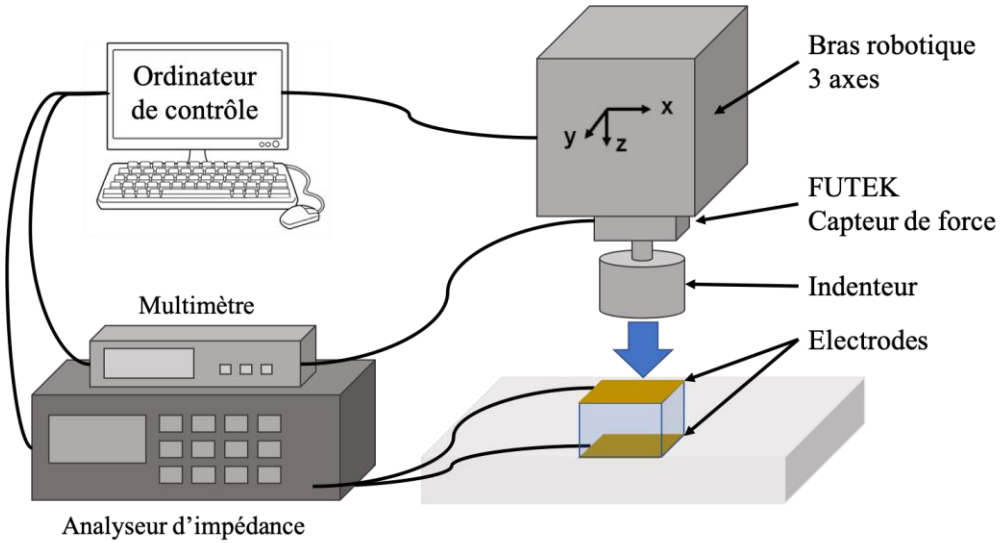
Ratio volumique (sucre : PDMS)	Taille grains de sucre	Porosité (%)	ε_r théorique	ε_r mesurée
4:1	Petit	78.58 ± 3.11	1,36	1.38 ± 0.12
	Moyen	79.76 ± 1.42	1.34	1.38 ± 0.07
	Gros	81.22 ± 0.97	1.32	1.41 ± 0.06
	Moyenne	$\mathbf{79.85 \pm 1.83}$	**1.34**	$\mathbf{1.39 \pm 0.08}$
6:1	Petit	82.84 ± 1.28	1.29	1.29 ± 0.15
	Moyen	85.18 ± 0.85	1.25	1.25 ± 0.05
	Gros	85.02 ± 1.08	1.25	1.30 ± 0.15
	Moyenne	$\mathbf{84.35 \pm 1.07}$	**1.26**	$\mathbf{1.28 \pm 0.12}$

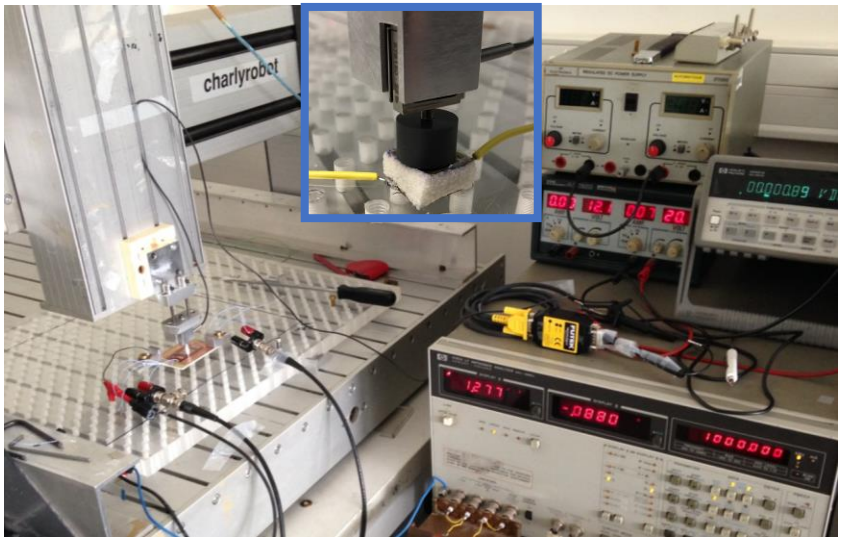
Plan

- Introduction
- Capteurs souples capacitifs de pression
- Fabrication et caractérisation de PDMS poreux
- Caractérisation électromécanique
- Conclusion et perspectives

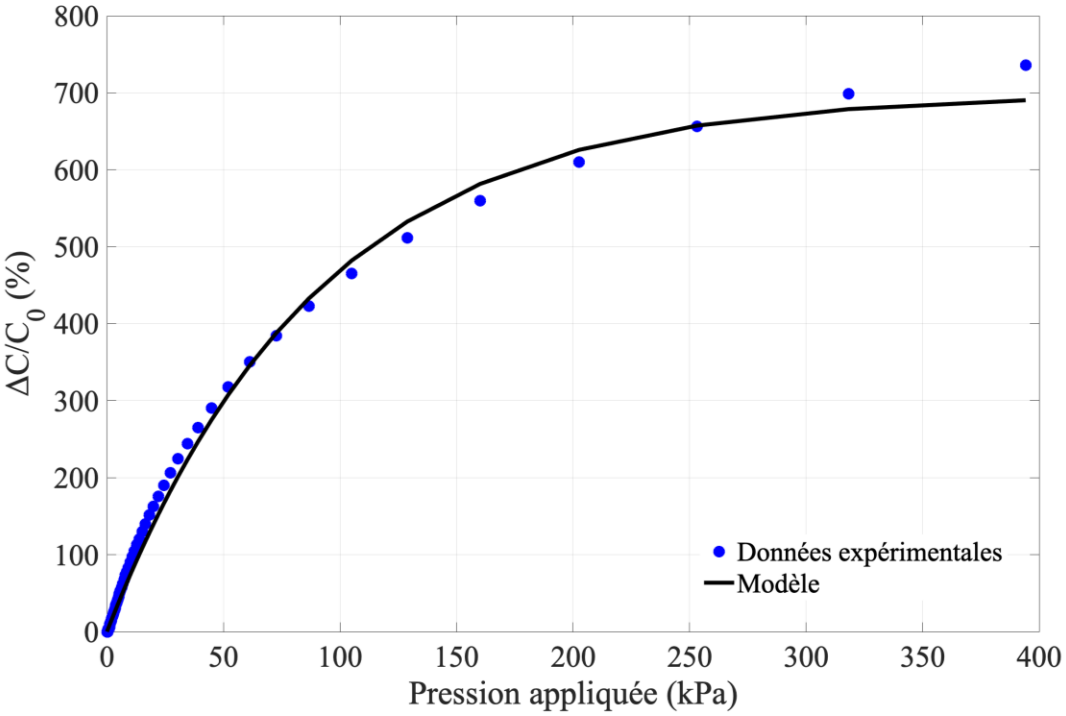
Caractérisation électromécanique de la mousse de PDMS

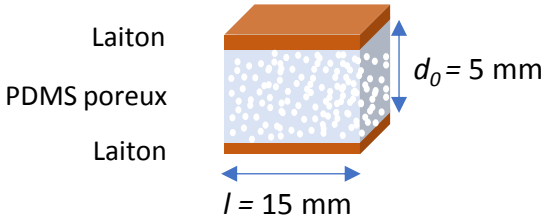




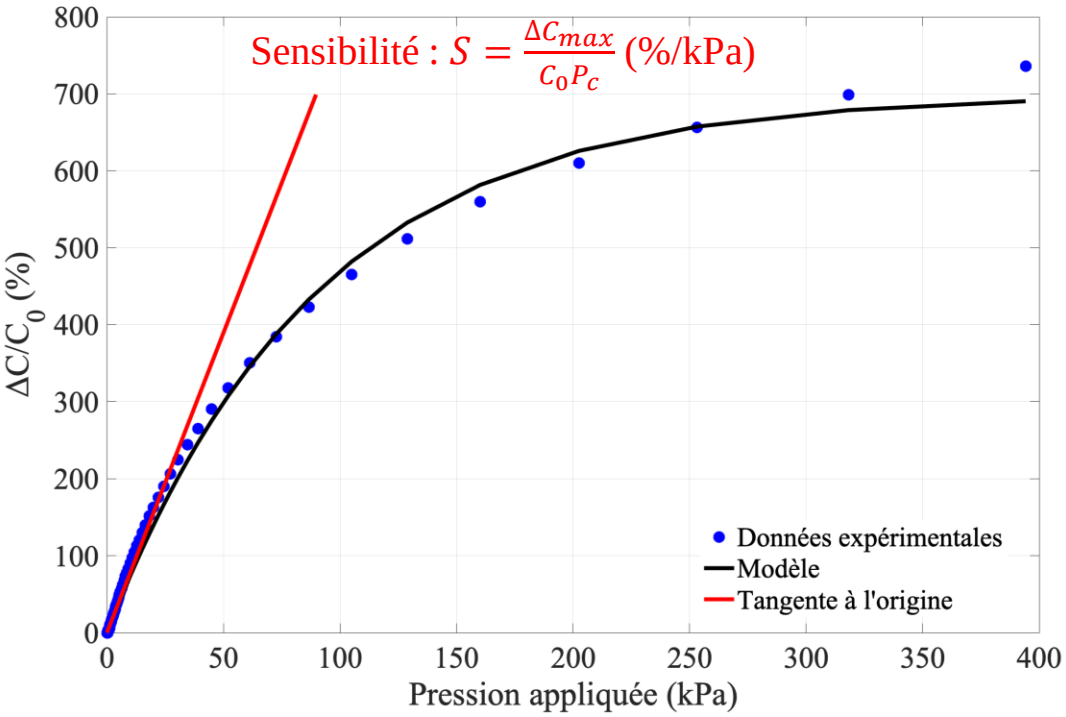


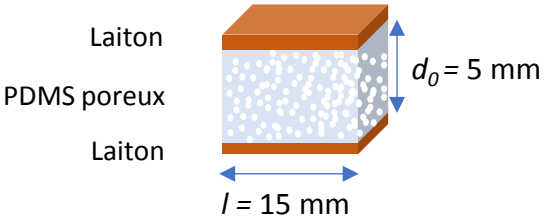
Modèle comportemental



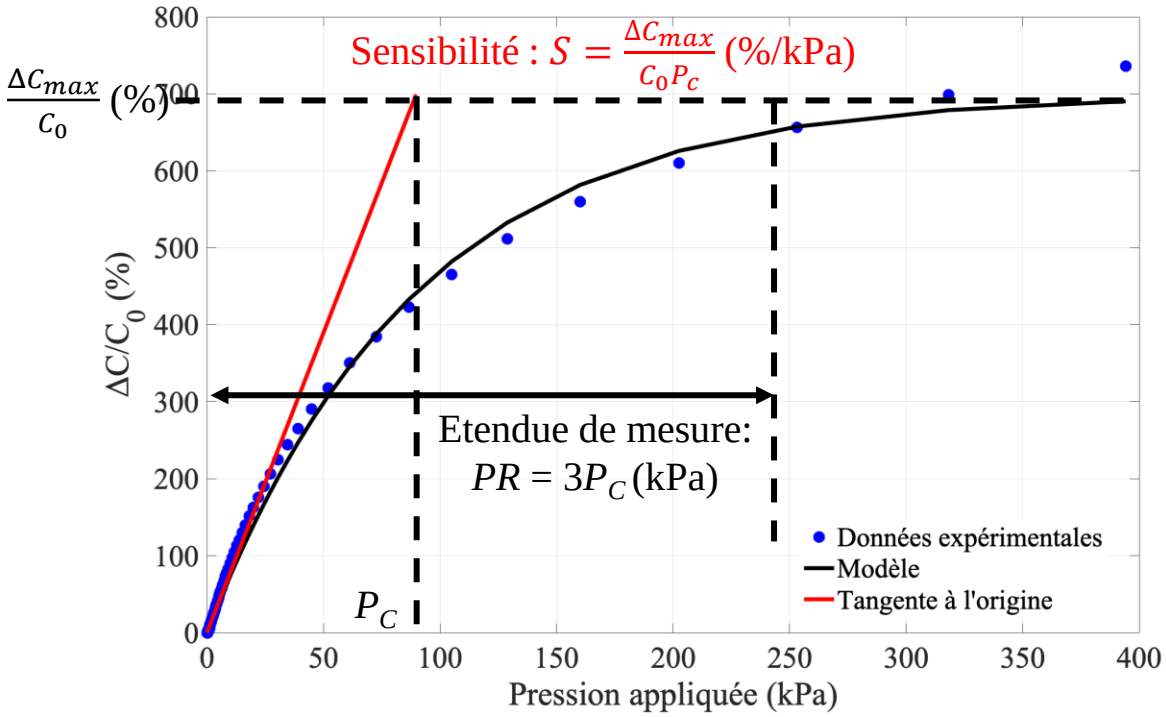


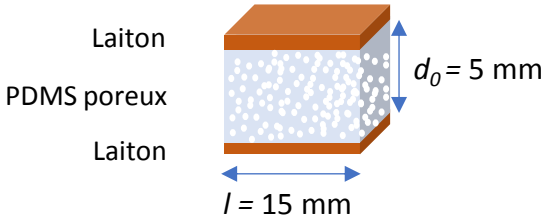
Modèle comportemental



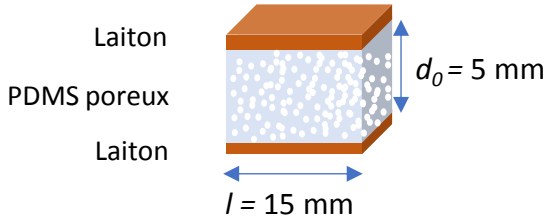


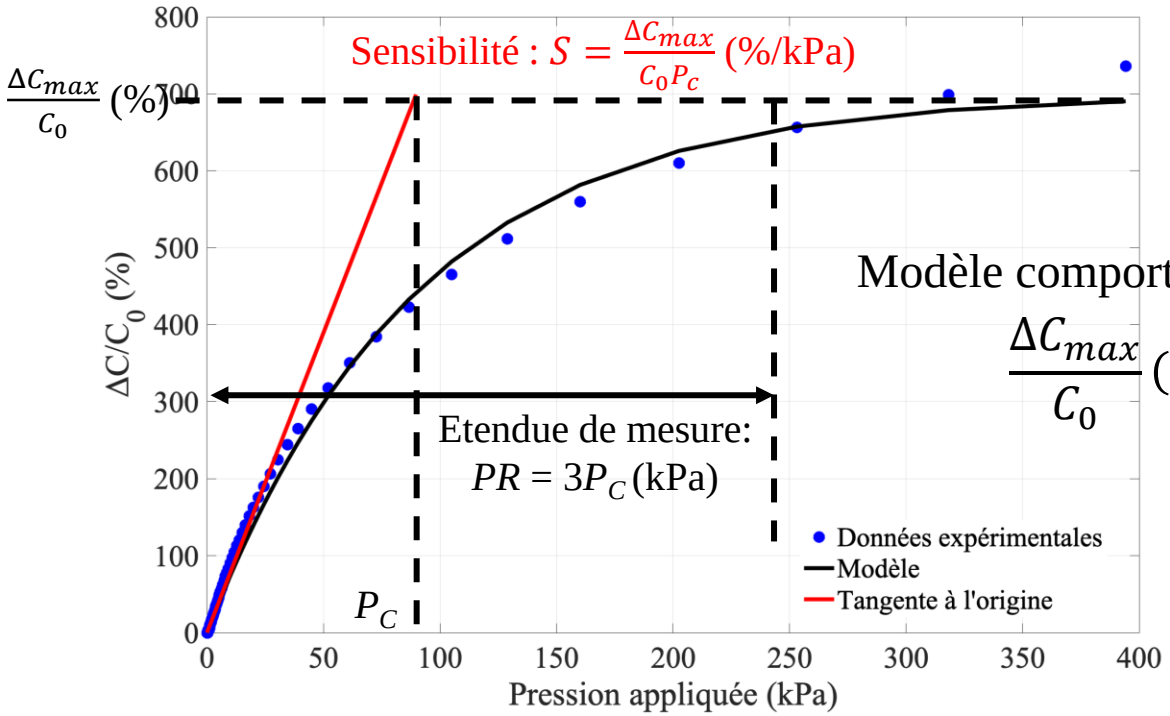
Modèle comportemental





Modèle comportemental



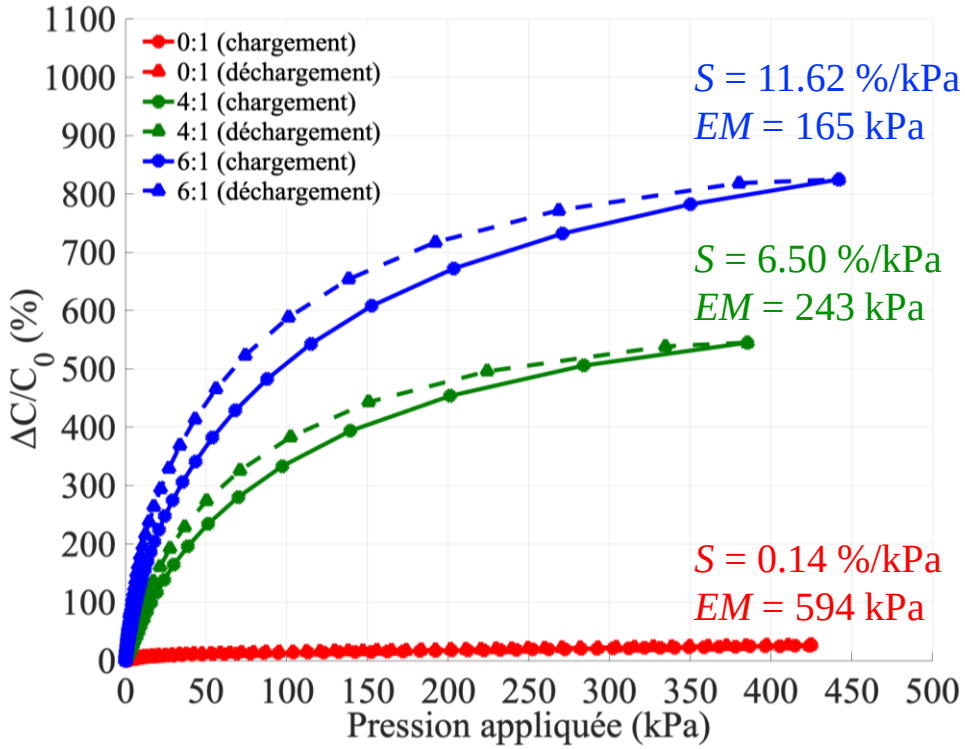


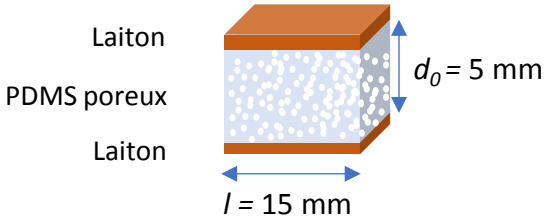
Modèle comportemental exponentiel de 1er ordre :

$$\frac{\Delta C_{max}}{C_0}(\%) = \frac{\Delta C_{max}}{C_0}\left(1 - e^{-\frac{P}{P_C}}\right)$$

Caractérisation électromécanique

Influence de la concentration sur les performances





Concentration ↗

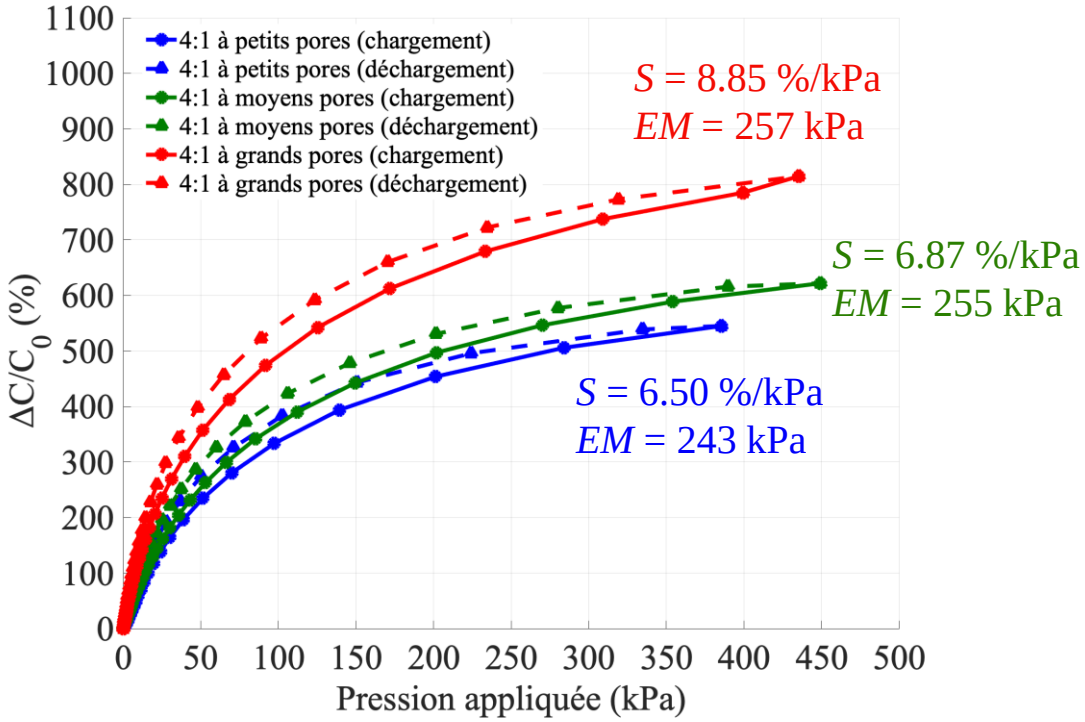
↓

Sensibilité ↗

Étendue de mesure ↘

Caractérisation électromécanique

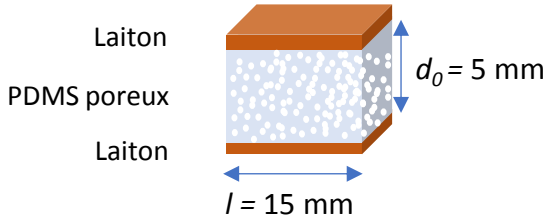
Influence de la taille des pores sur les performances



S = 8.85 %/kPa
EM = 257 kPa

S = 6.87 %/kPa
EM = 255 kPa

S = 6.50 %/kPa
EM = 243 kPa



Taille des pores ↗

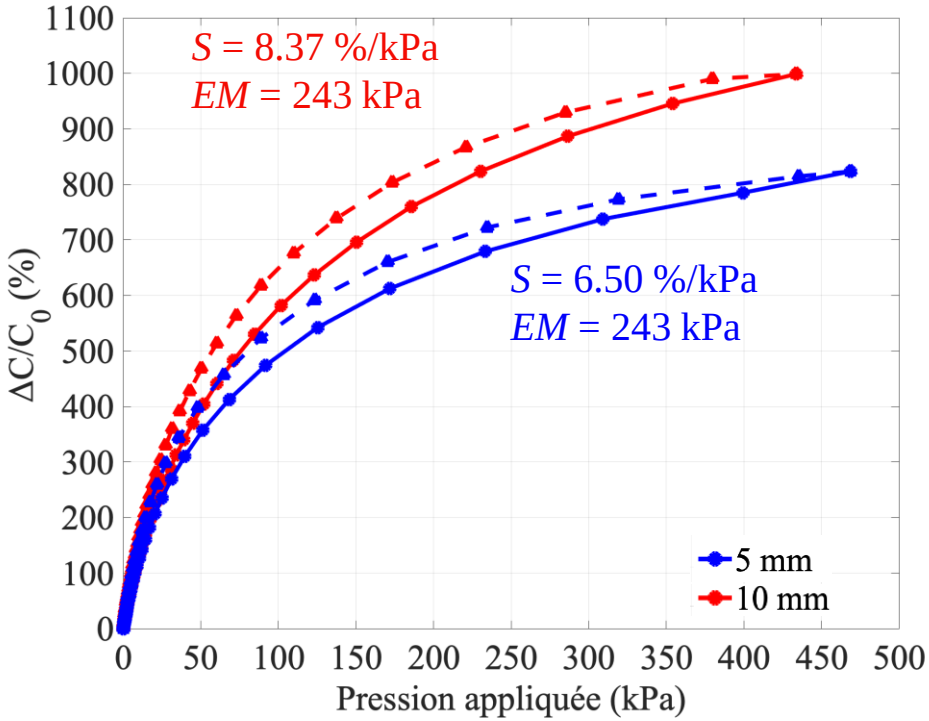
↓

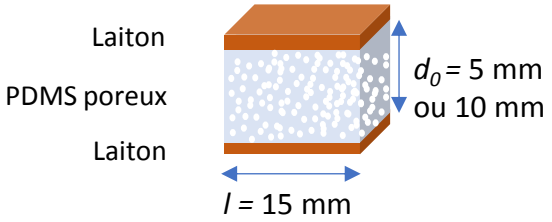
Sensibilité ↗

Étendue de mesure →

Caractérisation électromécanique

Influence de l'épaisseur sur les performances





Epaisseur ↗

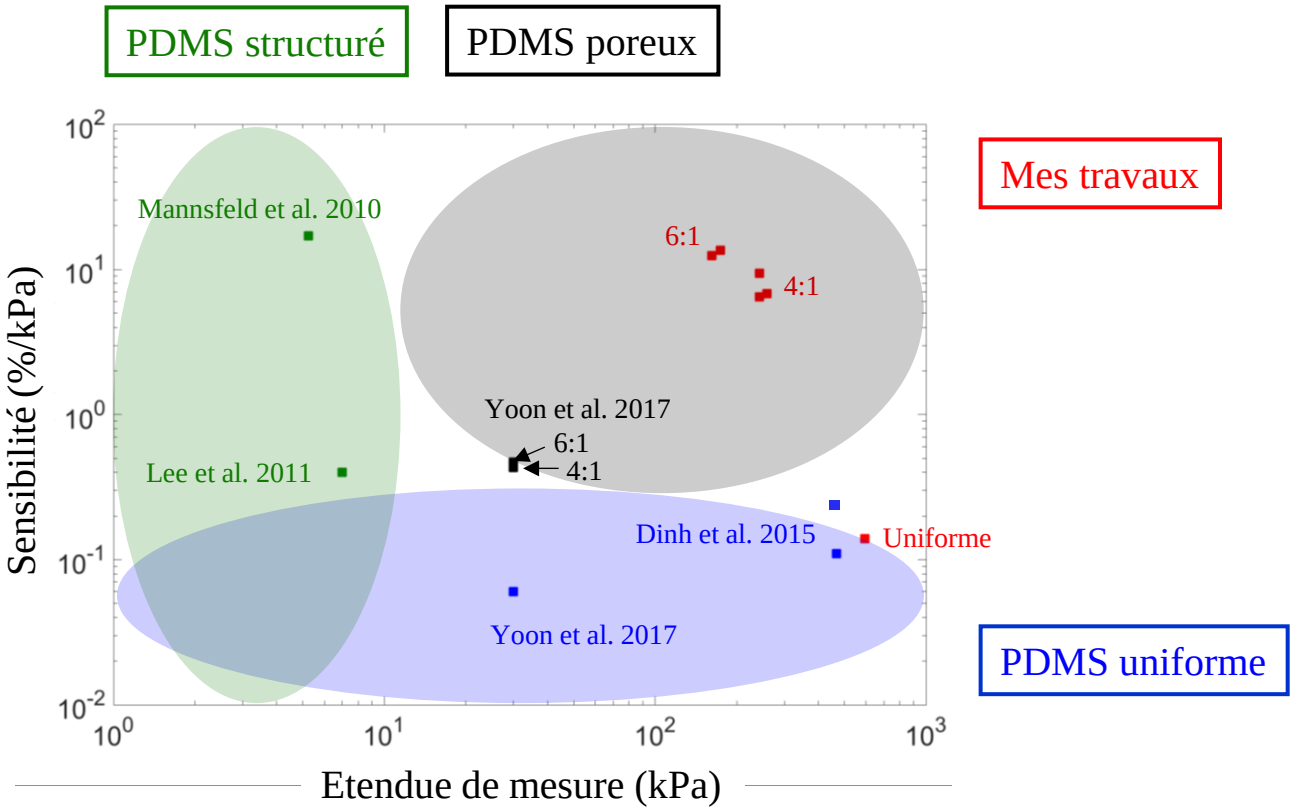
↓

Sensibilité ↗

Étendue de mesure →

Etendue de mesure/Sensibilité

Carte de performances des capteurs de pression de PDMS



Conclusion et perspectives

Conclusion :

- Capteurs plus performants qu'avec du PDMS uniforme
- Plus simple à fabriquer qu'avec du PDMS structuré
- Ajustement des performances par le contrôle de la porosité

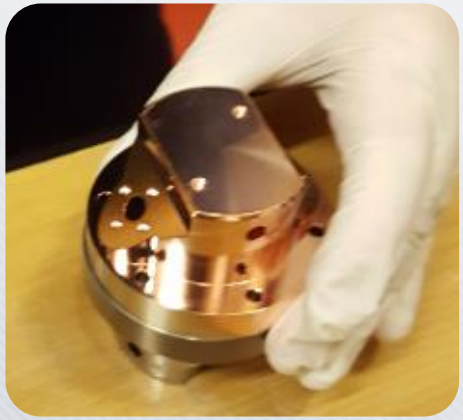
Perspectives :

- Cisaillement
- Fatigue mécanique
- Robustesse du matériau à l'humidité et à la température
- Miniaturisation par microfabrication

Merci pour votre attention

Vers un étalon quantique pour des mesures de pression absolue de 200 Pa à 20 kPa basé sur une cavité hyperfréquence supraconductrice

Pascal Gambette
Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam



Le Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam

Laboratoire National de métrologie et d'Essais

Conservatoire National des arts et métiers

Missions:
Mise en place, conservation, amélioration et le transfert de références métrologiques françaises (masses, rayonnements optiques, longueurs et température).

Prestations:
Etude et étalonnage.

Trappes

Paris 15e

La Plaine Saint-Denis

LNE le cnam

Le projet : une collaboration européenne

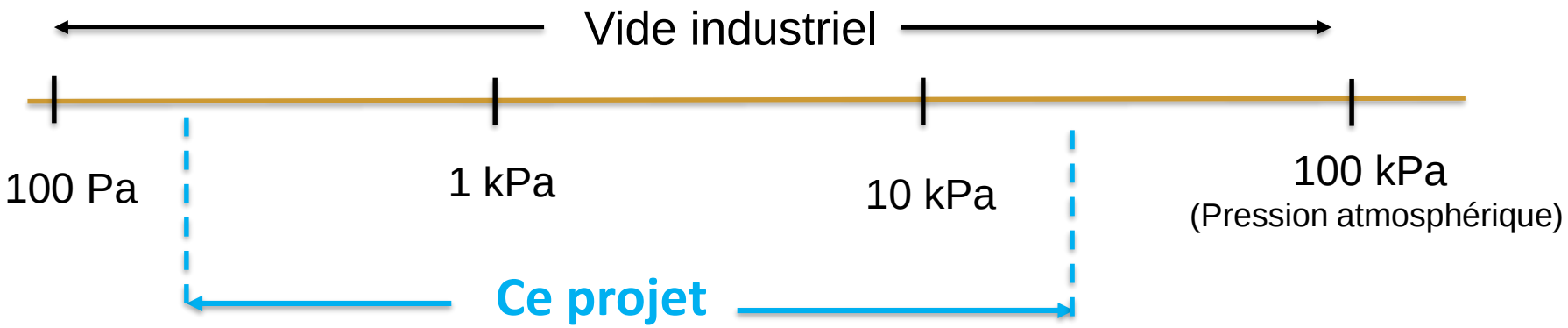
Laboratoire National de métrologie et d'Essais
Métrologie des pressions
(Pierre Otal, Frédéric Boineau)

Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam
Thermométrie basse température
(Laurent Pitre, Fernando Sparasci, Mark Plimmer)

Istituo Nazionale di Ricerca Metrologica
(Roberto Gavioso, Daniele Madonna Ripa)

Joint Research Laboratory Evangelista Torricelli

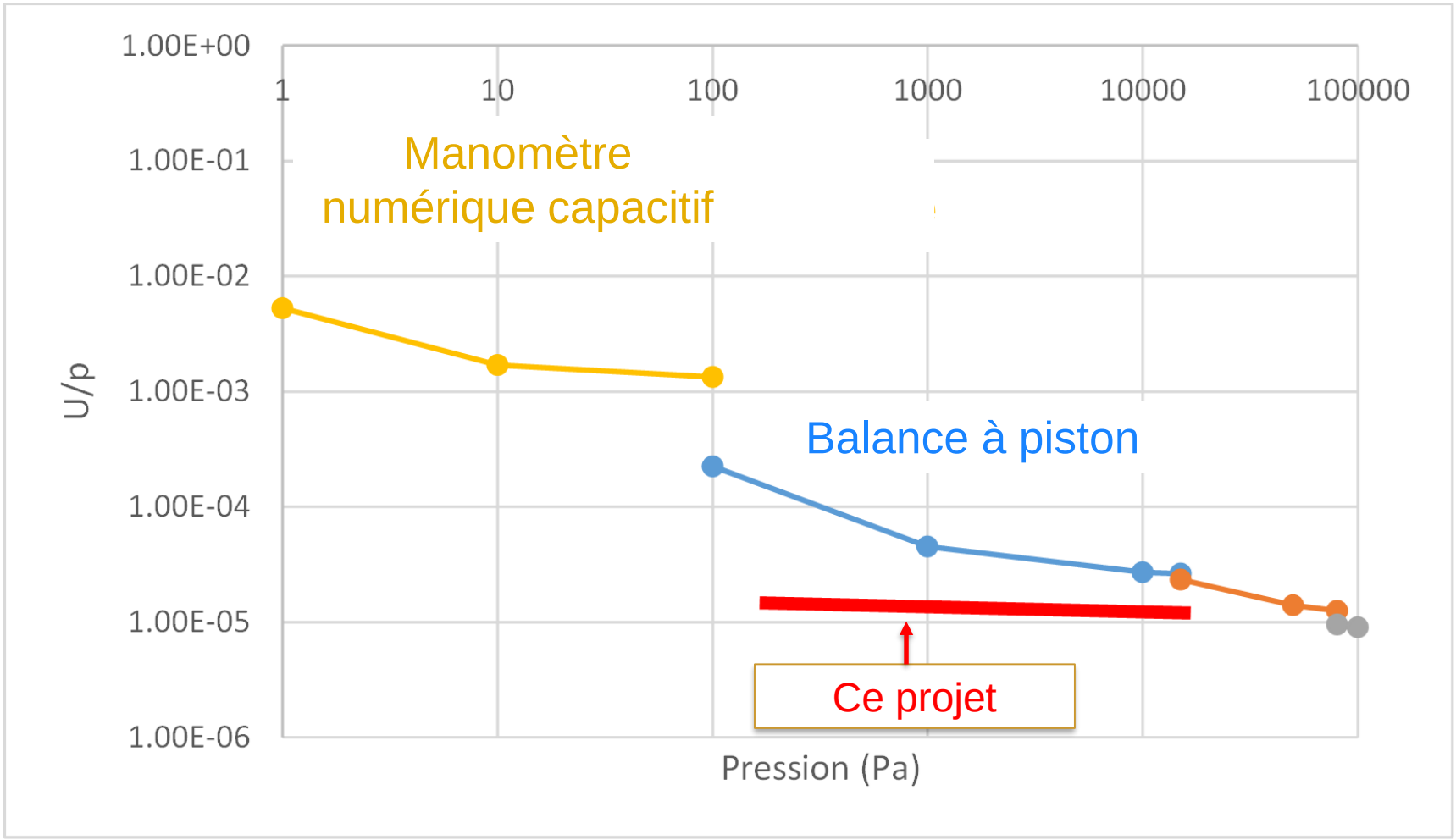
Gamme pression absolue de 200 Pa à 20 kPa



Applications :

- Fabrication de circuits intégrés
- Procédés chimiques (distillation,…)
- Métallurgie sous vide
- Lyophilisation
- Agroalimentaire
- Production de tubes à décharges
- Etude des matériaux

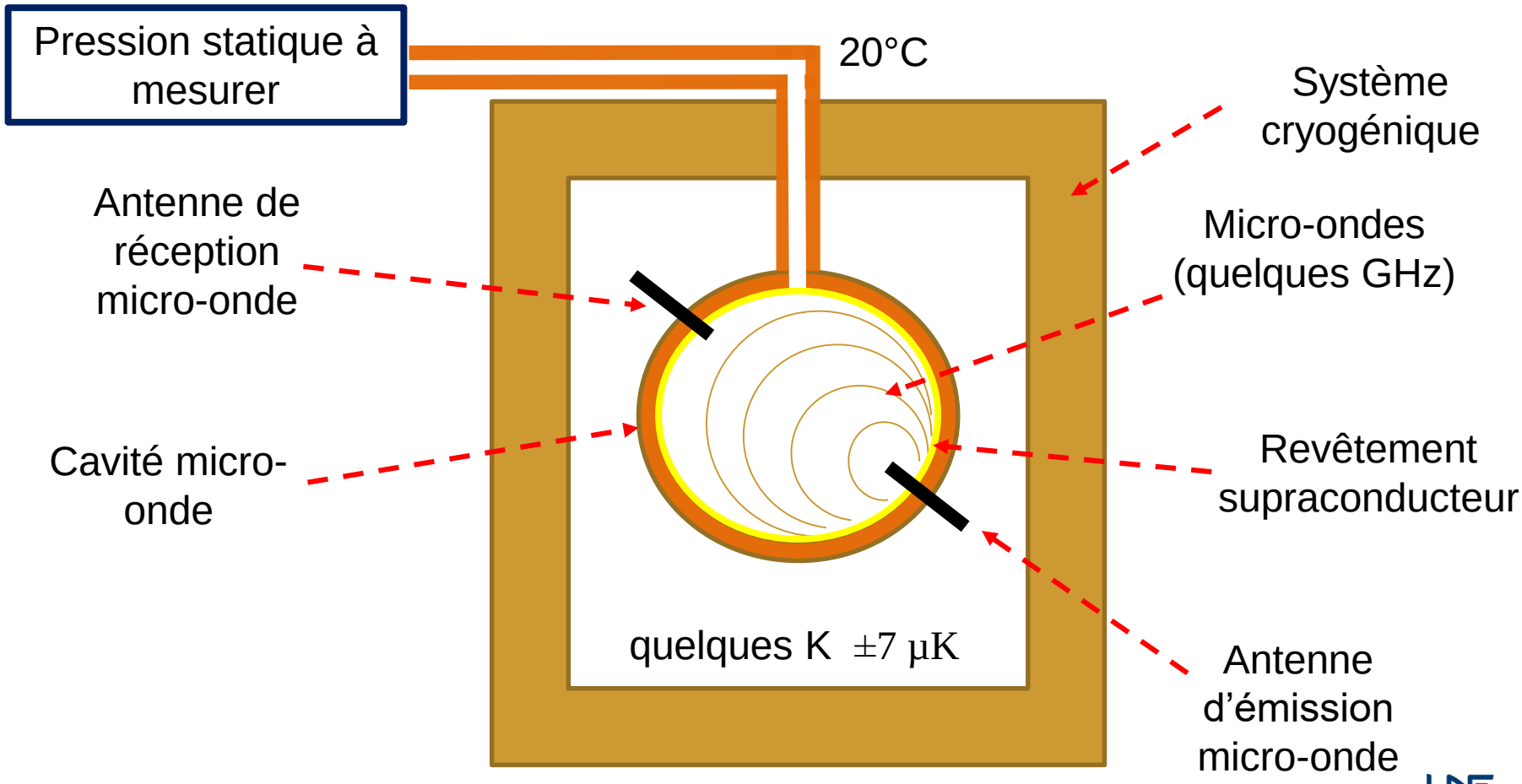
Estimation des performances par rapport aux étalons actuels (LNE)



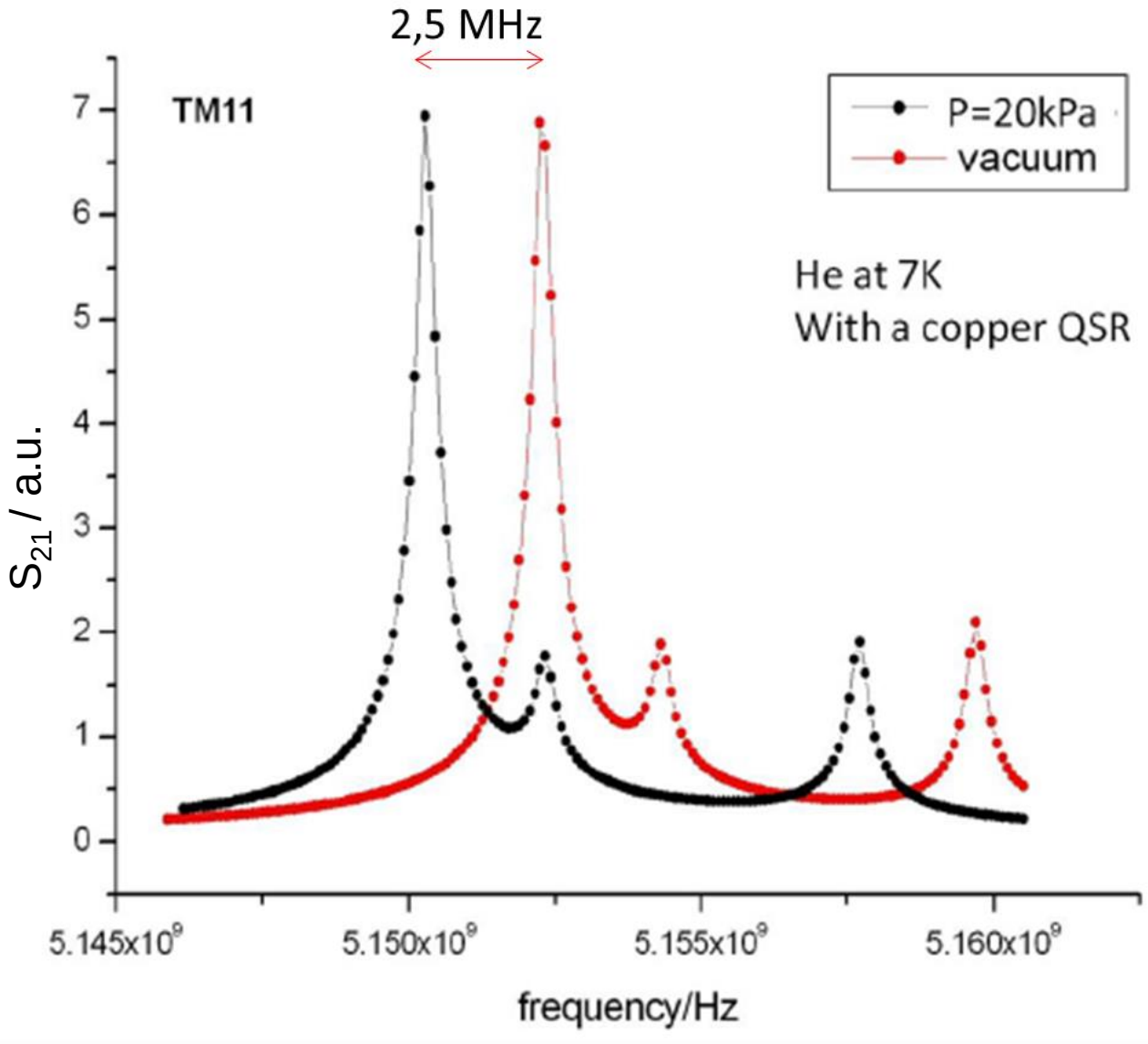
LNE le cnam

Mesure de l'indice de réfraction d'une onde électromagnétique dans de l'hélium (He4) gazeux à température constante et comparaison avec le modèle ab initio

$$f_{mes}(P,T) \rightarrow n_{mes}(P,T) = n_{ab\ initio}(P,T) \rightarrow P$$



Effet de l'indice de réfraction sur la fréquence de résonance micro-onde



LNE le cnam

Détermination de la pression à partir de la fréquence de résonance micro-onde (1/2)

(indice de réfraction n)^2

$$\varepsilon_r \mu_r = F\left(\frac{\text{Fréquence de résonance sous vide}}{\text{Fréquence de résonance sous gaz}}, \text{Pression p}\right)$$

perméabilité magnétique relative μ_r

permittivité électrique relative ε_r

μ_r, ε_r

$$\begin{cases} \mu_r = H_1(\text{Masse volumique } \rho) \\ \varepsilon_r = H_2(\text{Masse volumique } \rho) \end{cases}$$

Equations de Clausius-Mossotti

La pression est déterminée par calcul récursif

p

pression

ρ

$$\text{Pression} = G\,(\text{Température x Masse volumique } \rho)$$

Masse volumique de l'hélium 4

Détermination de la pression à partir de la fréquence de résonance micro-onde (2/2)

Fréquence de résonance sous vide

perméabilité magnétique relative μ_r

permittivité électrique relative ε_r

compressibilité

$$\varepsilon_{r\,He}(p,T)\,\mu_{r\,He}(p,T) = \left(\frac{\left\langle f_{ln}^{em} + \Delta f_{ln}^{em} \right\rangle_{p=0} \left(1 + \kappa_T\, p/3\right)}{\left\langle f_{ln}^{em} + \Delta f_{ln}^{em} \right\rangle} \right)^2$$

pression

μ_r, ε_r

La pression est déterminée par calcul récursif

p

Fréquence de résonance sous gaz

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = A_\varepsilon \rho \left[1 + b_\varepsilon \rho + c_\varepsilon \rho^2 + \ldots \right]$$

$$\frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} = A_\mu \rho + \ldots$$

ρ

$$p = RT\,\rho \left[1 + B_\rho \rho + C_\rho \rho^2 + D_\rho \rho^3 + \ldots \right]$$

Température

Masse volumique ρ de l'hélium 4

Equations de Clausius-Mossotti

LNE le cnam

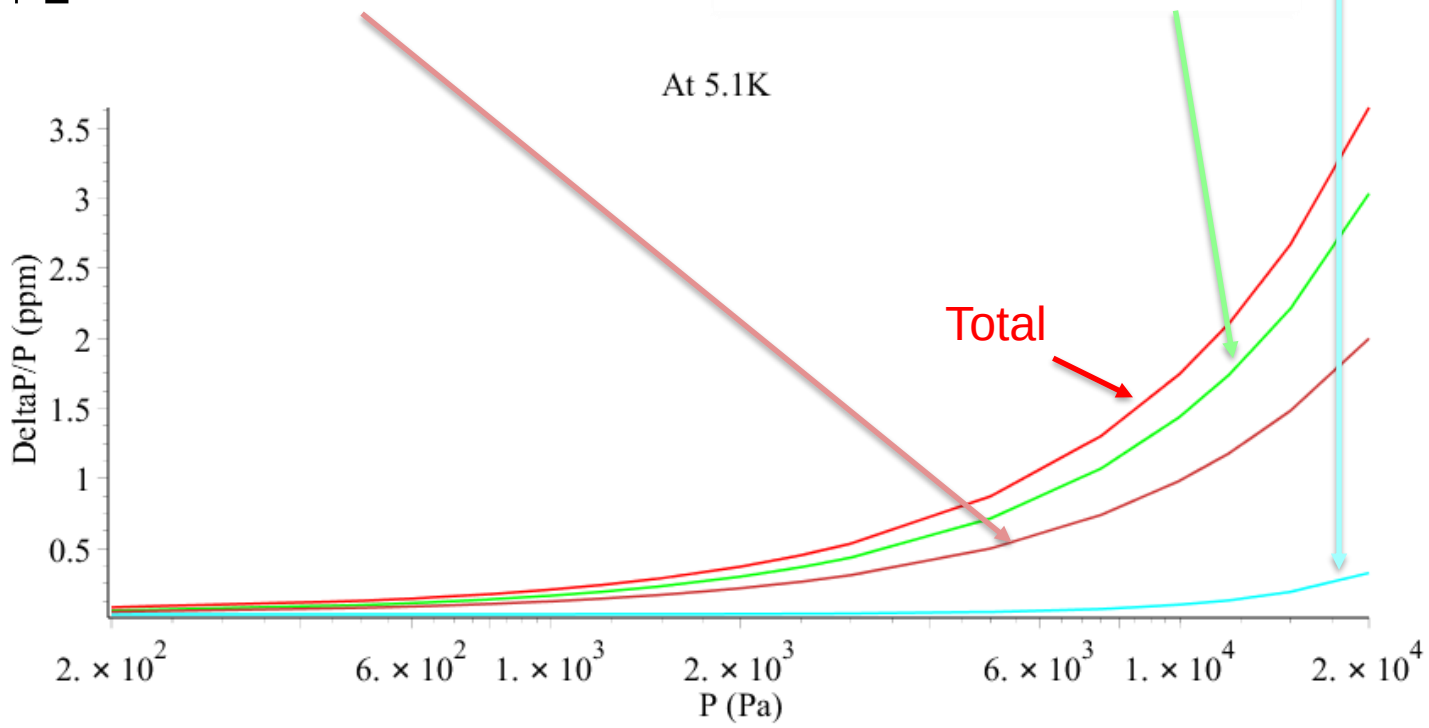
Propagation des incertitudes (1/2)

Equation de Clausius-Mossotti

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = A_\varepsilon \rho \left[1 + b_\varepsilon \rho + c_\varepsilon \rho^2 + \ldots\right]$$

Densité du gaz

$$p = RT\rho\left[1 + B_\rho \rho + C_\rho \rho^2 + D_\rho \rho^3 + \ldots\right]$$



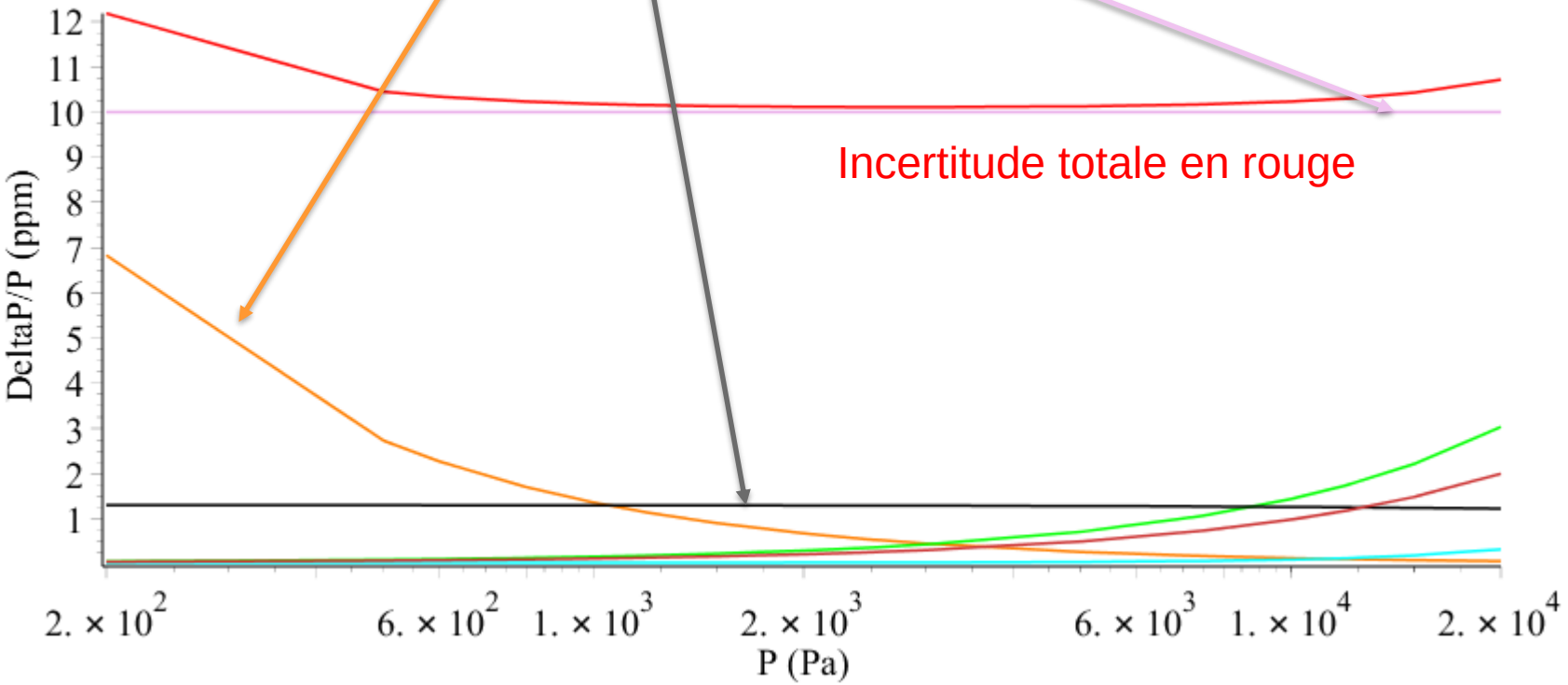
LNE le cnam

Propagation des incertitudes (2/2)

Sans incertitude avec la revision du SI

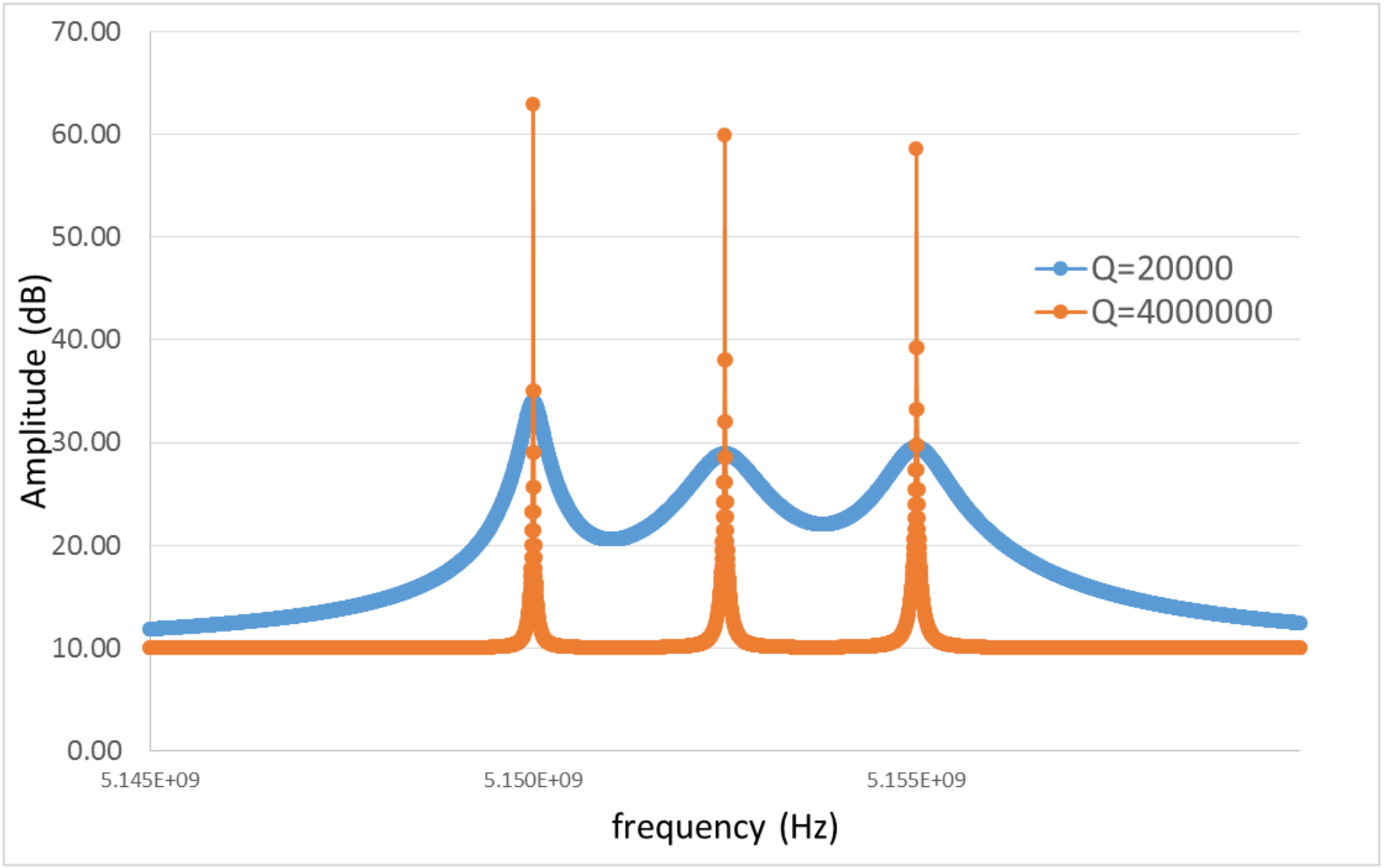
$$\varepsilon_{r\,He}(p,T)\mu_{r\,He}(p,T)=\left(\frac{\left\langle f_{ln}^{em}+\Delta f_{ln}^{em}\right\rangle_{p=0}\left(1+\kappa_T\,p/3\right)}{\left\langle f_{ln}^{em}+\Delta f_{ln}^{em}\right\rangle}\right)^2 \qquad p=RT\rho\left[1+B_\rho\rho+C_\rho\rho^2+D_\rho\rho^3+\ldots\right]$$

at 5.1K



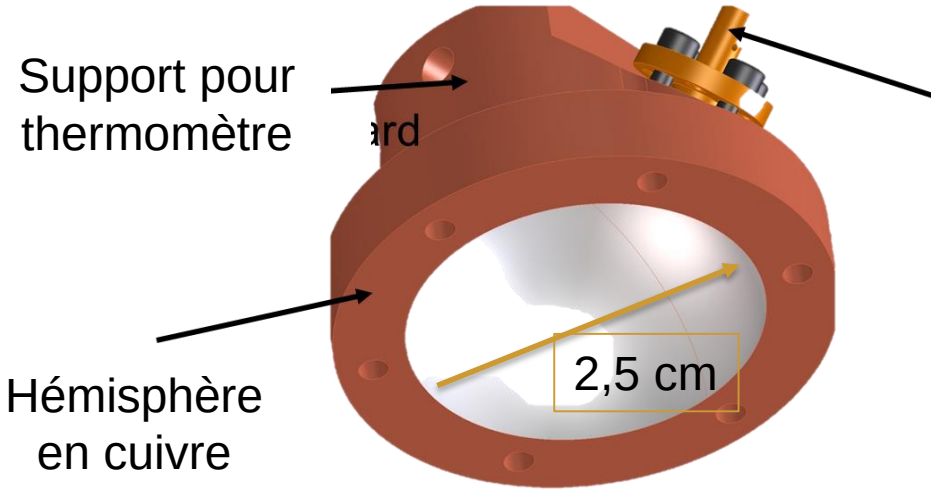
le cnam

Effet du revêtement supraconducteur sur le spectre en fréquence



Premier prototype de résonateur quasi-sphérique avec revêtement interne de niobium

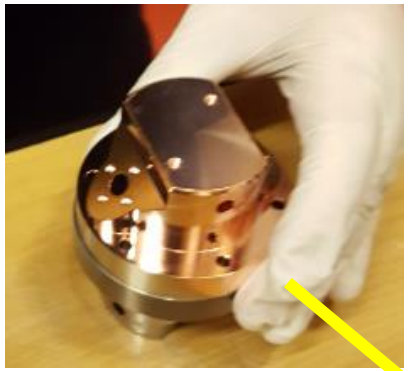
Rayon interne de 2,5 cm



Revêtement supraconducteur en niobium

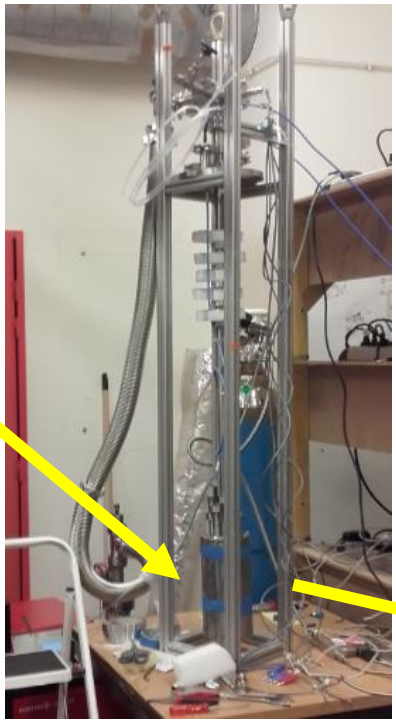
Epaisseur du revêtement de niobium: 3 µm

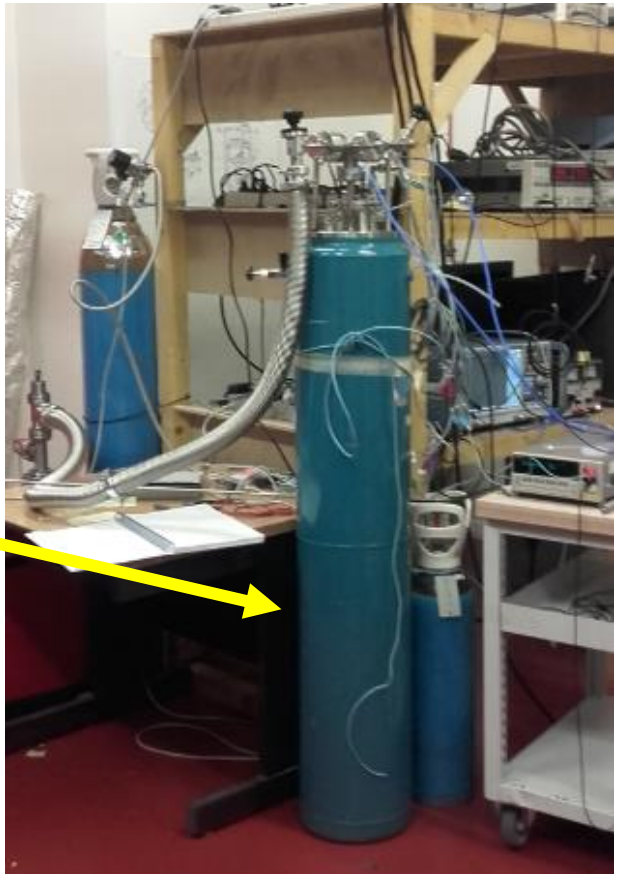
Montage expérimental



Cavité supraconductrice (revêtement de niobium)

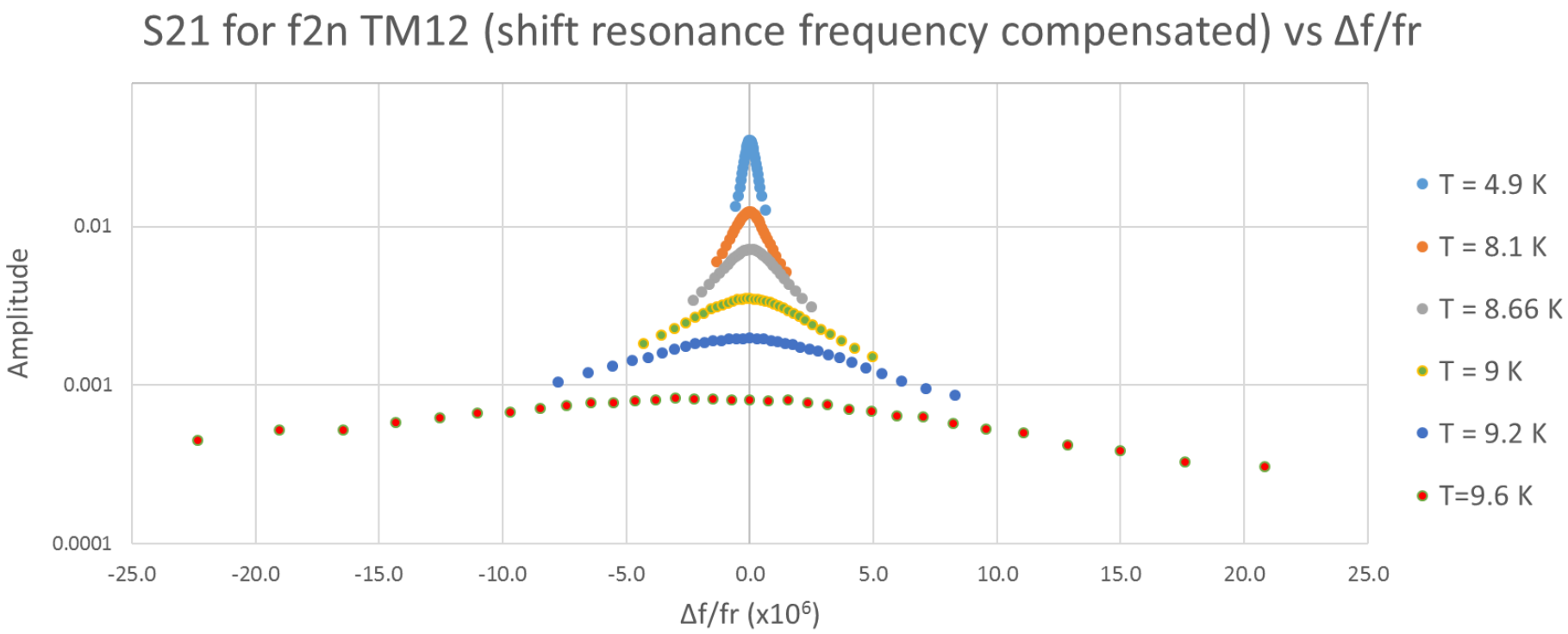
Cryostat



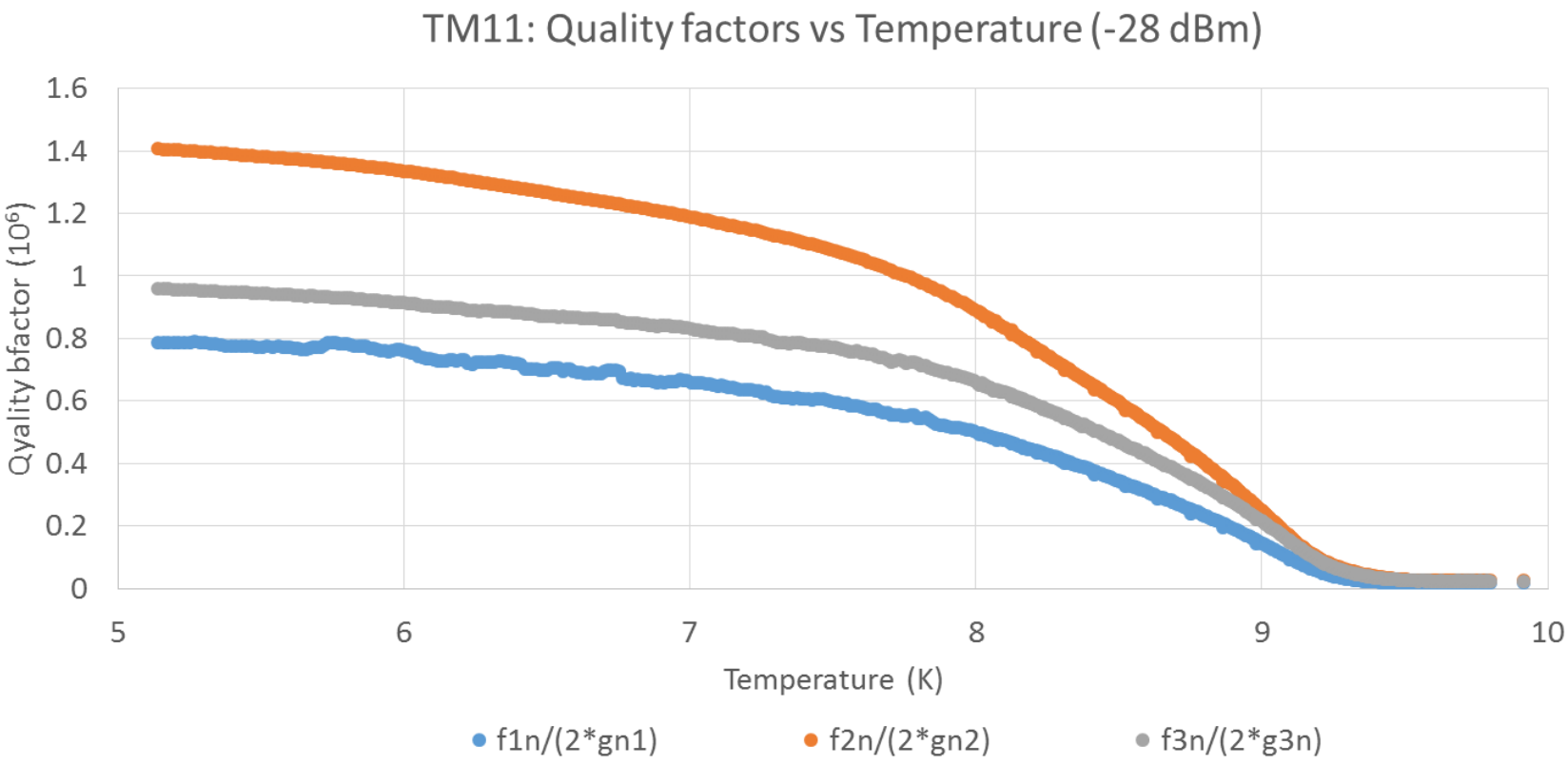


Quelques Résultats expérimentaux

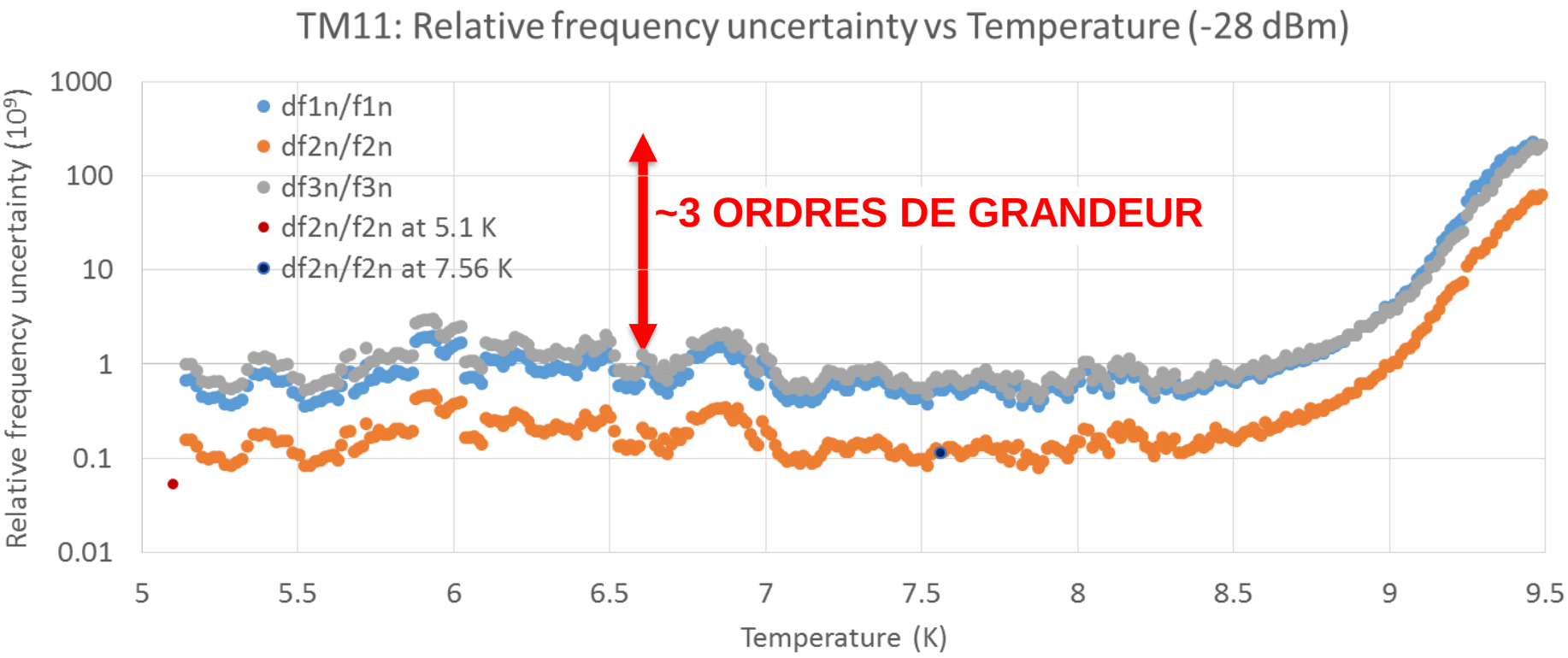
EFFET DE LA TEMPÉRATURE SUR LA RÉPONSE EN FRÉQUENCE



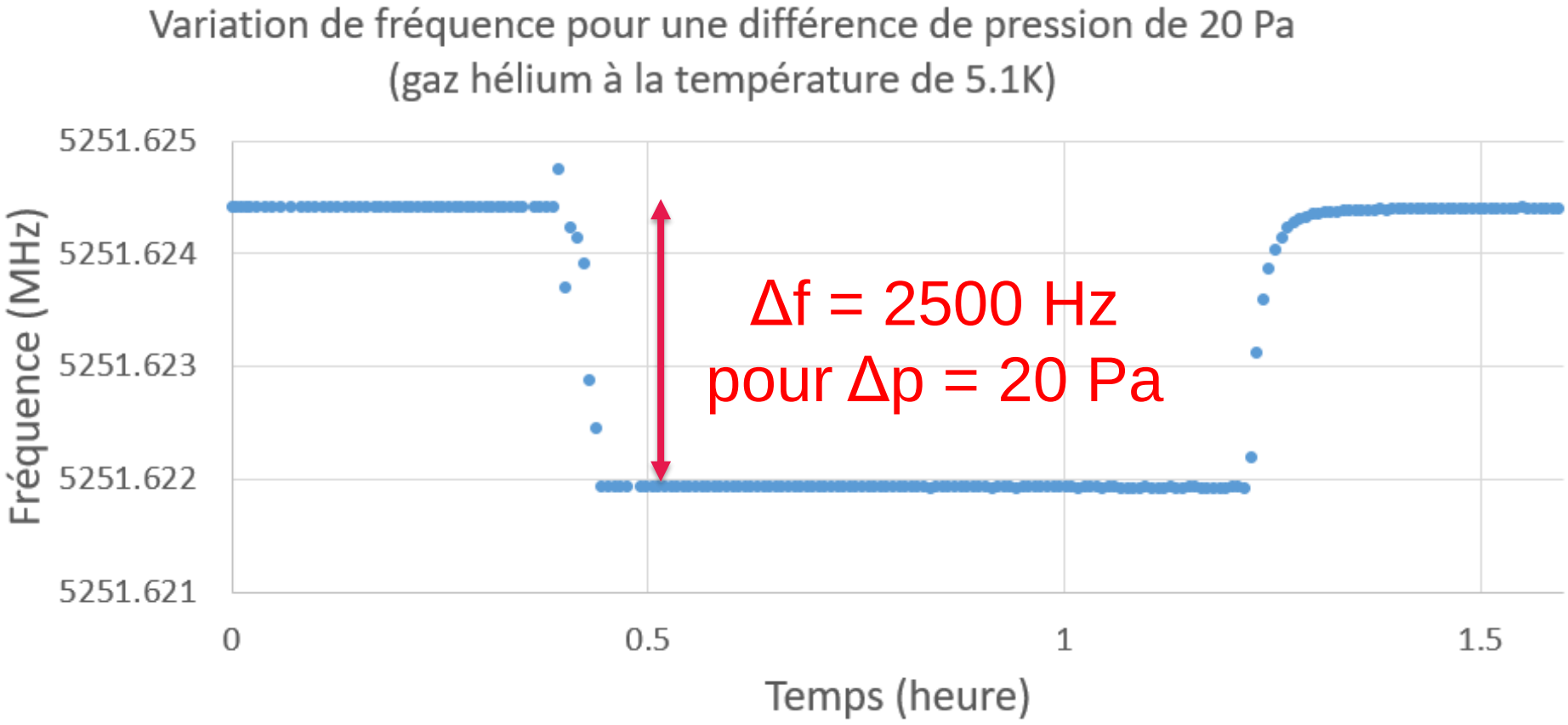
FACTEUR DE QUALITÉ EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE



INCERTITUDE RELATIVE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE



ESTIMATION DE LA RÉSOLUTION



Resolution 3 mPa

EN RÉSUMÉ

Objectif du projet :
Conception et réalisation d'un étalon quantique pour des mesures de pression absolue de 200 Pa à 20 kPa basé sur une cavité hyperfréquence supraconductrice

Quelques remarques:
- l'aspect quantique (calcul ab initio) permet de réduire les incertitudes
- l'incertitude prépondérante porte sur la mesure de température
- l'utilisation de la supraconductivité augmente la résolution des mesures

Résultat présenté:
La résolution atteinte est compatible avec les performances attendues

Objectif à venir: comparaison avec un étalon existant

Les micro-capillaires de verre pour l'étude de fluides et de systèmes biologiques sous conditions sévères

I-POURQUOI ?
II-COMMENT ?
III-EXEMPLES

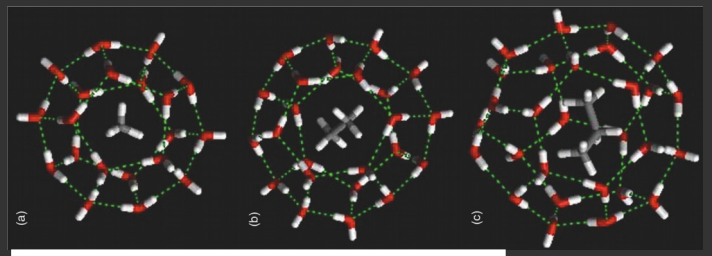
Patrick Bouriat
Kedi Zhou
Nelly Hobeika
Abdelhafid Touil
Daniel Broseta

Anthony Ranchou-Peyruse
Ross Brown

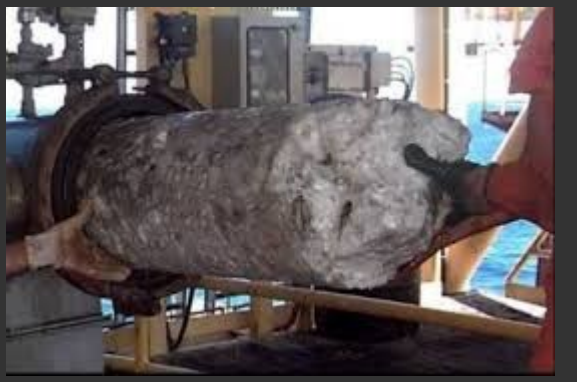
I POURQUOI ? - **LES HYDRATES DE GAZ**

- Clathrates : l'eau (glace) piège des gaz : CH_4, CO_2,…

-Stabilité typique **$10 < p < 200$bar**
$-10 < T < 10$ °C

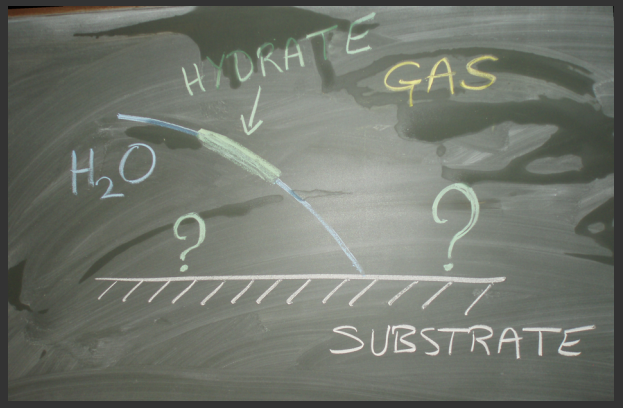


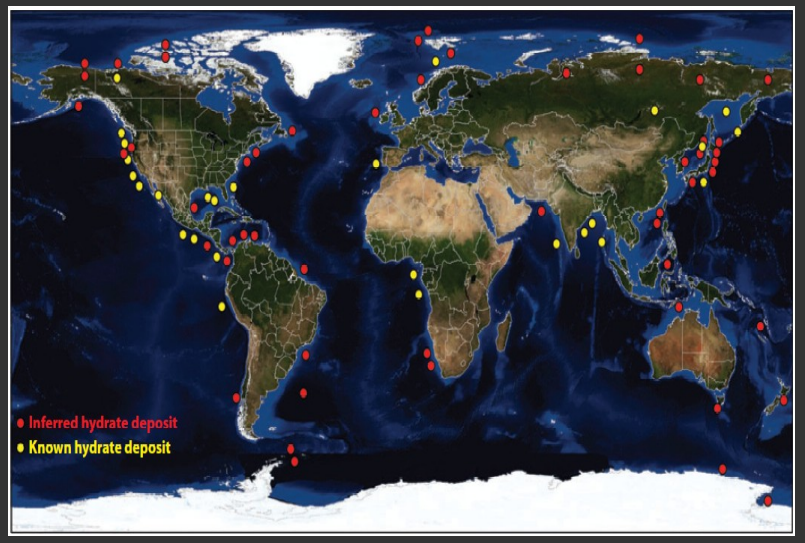
C.A. Koh *Chem. Soc. Rev.* **31** (2002) 157-167.



ANR ***HYDRE***

-Interactions avec un substrat (sédiment) ?





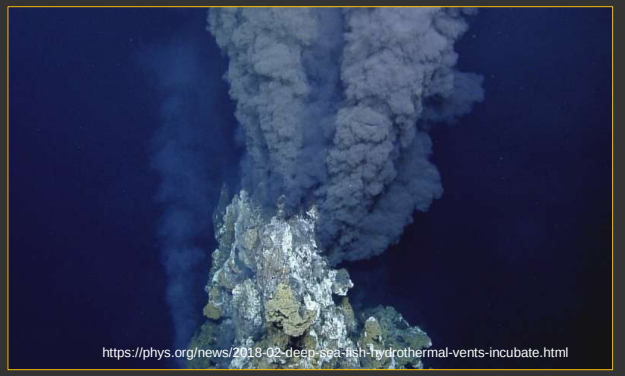
-Processus+propriétés à l'échelle 1µm ?

I POURQUOI ? - MICROBIOLOGIE DES MILIEUX EXTRÊMES

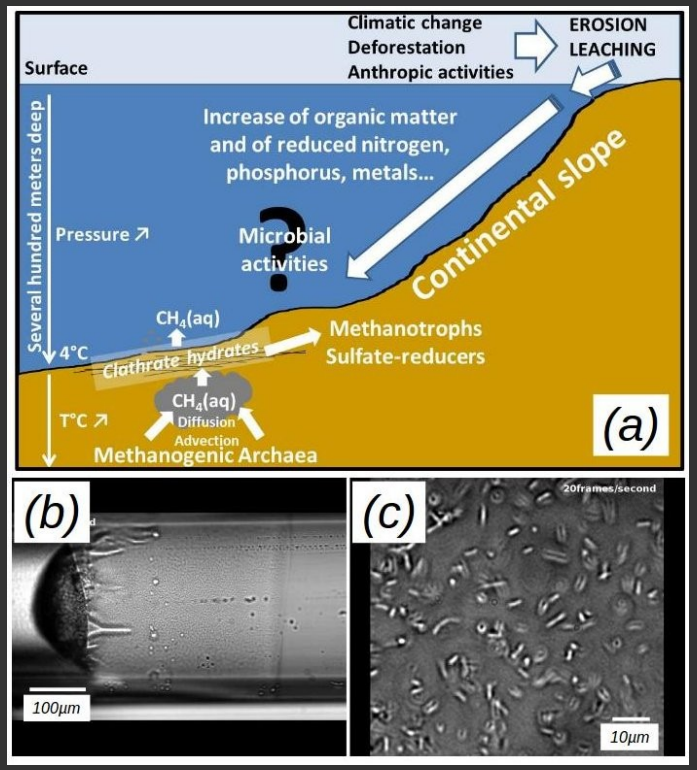
- Grands fonds marins, mines, sources chaudes, ...

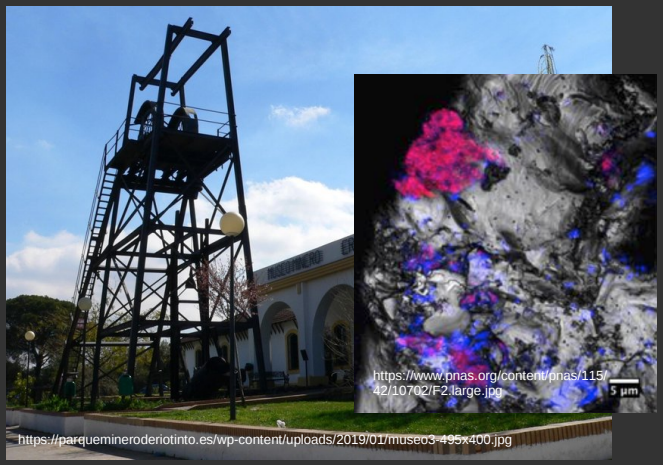
-Conditions de vie connues

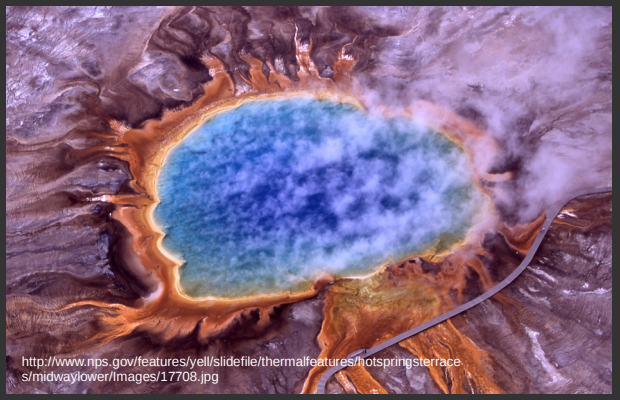
p < 400bar
-10 < T < 120 °C
2 < pH < 11
anoxie



-Observer directement l'écologie en conditions *in situ*







-Interactions avec le milieu: sédiments, hydrates de gaz

ANR ***PHYMULE***

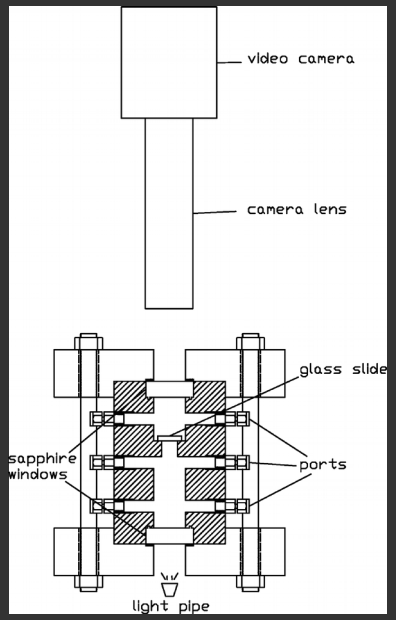
I POURQUOI ? - **POURQUOI LES CAPILLAIRES ?**

-Températures extrêmes
-pressions élevées
-milieux corrosifs
-…

→ Réduire la taille du système
-facilité
-sécurité

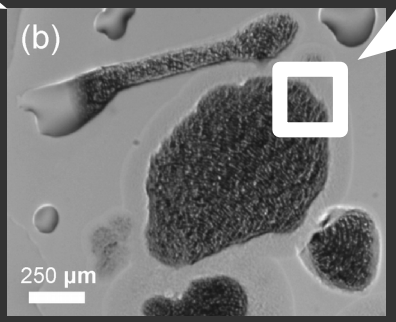
-Miniaturisation

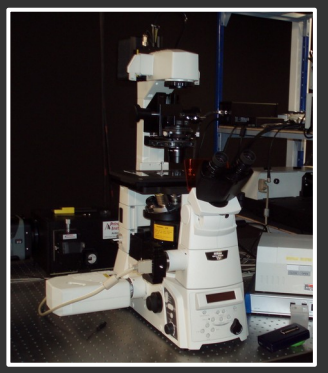
→ Microscopie optique, spectroscopie



≥10cm

Beltrán & Servio *Cryst. Growth. Des.* **10** (2010) 4339-4347





I POURQUOI ? - **POURQUOI LES CAPILLAIRES ?**

-Températures extrêmes
-pressions élevées
-milieux corrosifs
-…

→ Réduire la taille du système
-facilité
-sécurité

-Miniaturisation

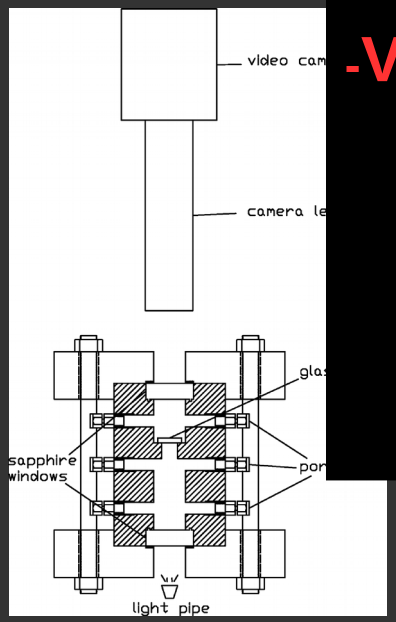
optique, spectroscopie

VOIR MIEUX

-résolution (<~1µm)

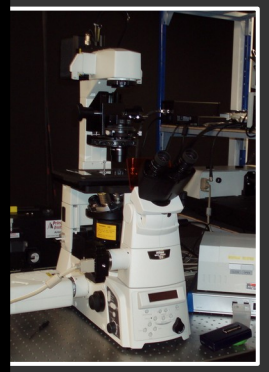
-VOIR AUTREMENT

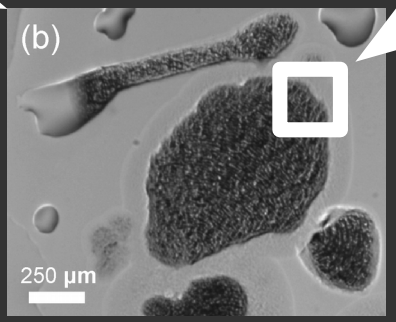
-transmission
-réflection
-profilométrie d'interférence
-contraste de phase
-fluorescence
-confocal/champ large
-.....



≥10cm

Beltrán & Servio *Cryst. Growth. Des.* **10** (2010) 4339-4347

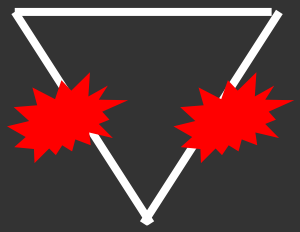




I POURQUOI ? - RÉSOUDRE **LE TRIANGLE DE DÉSAMOUR**

p **0-1000bar**
encombrant

-30°C < T < 100°C
condensation/isolation

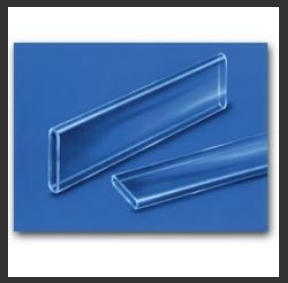


ACCÈS OPTIQUE :
distance de travail <~10mm
taille totale ≤ 50mm

III COMMENT ?

II COMMENT ? - µCAPILLAIRES EN SILICE OU EN BOROSILICATE !

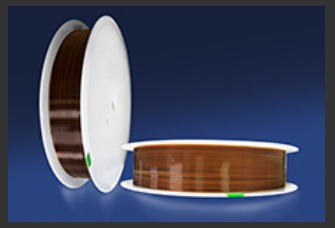
-Variété de formes



https://www.vitrocom.com

-De tailles : $\phi_{interne}$ **de ≈50µm à 2mm**

L de ≈10cm à plusieurs mètres



https://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/1068150065_CAPILLARY_TUBING.xml

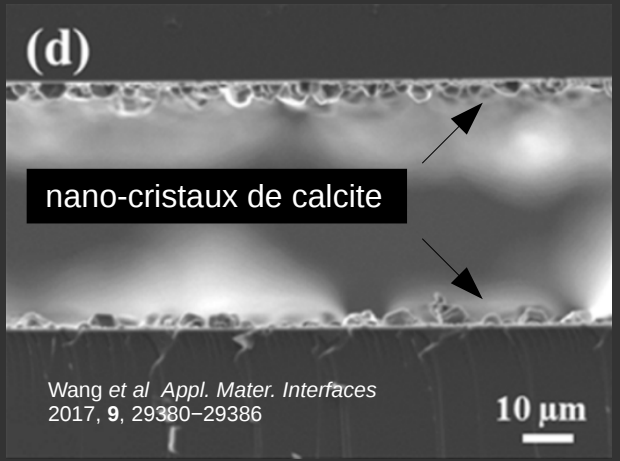
-**Qualité optique excellente**

-**État de surface modifiable** :

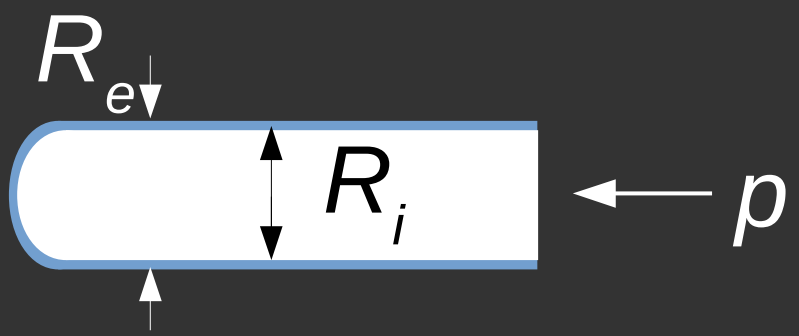
-hydrophile solution piranha, traitement plasma froid
-hydrophobe silanisation
-minéralisation greffage

-**Usinage par ablation laser**

-**Bon marché (1-10€ l'unité)**



II COMMENT ? - FRAGILES MAIS FORTS !
PRESSIONS LIMITES THÉORIQUES



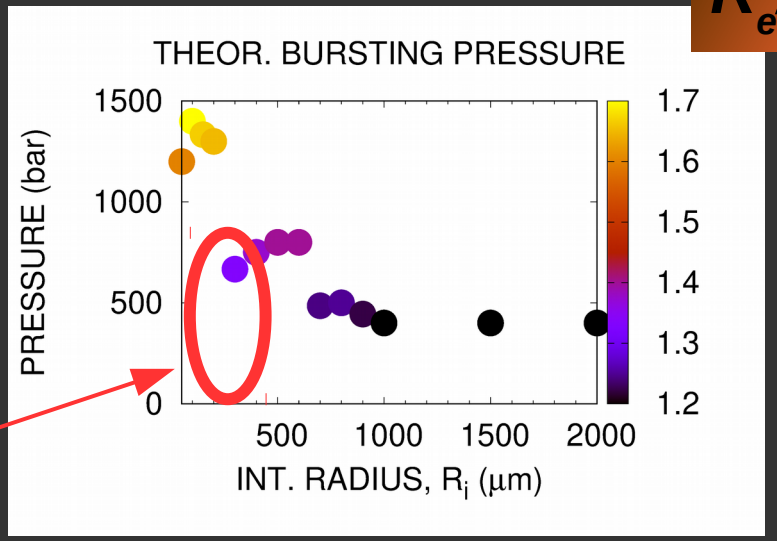
$$p_{lim}^{rad} = (R_e/R_i - 1)\sigma_{rupture}/2$$

$$p_{lim}^{long} = (R_e/R_i + 1)p_{lim}^{rad}$$

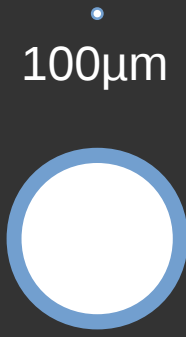
$\sigma_{rupture}$ dépend de

-l'état de surface
-les défauts
-la taille de la pièce
-…

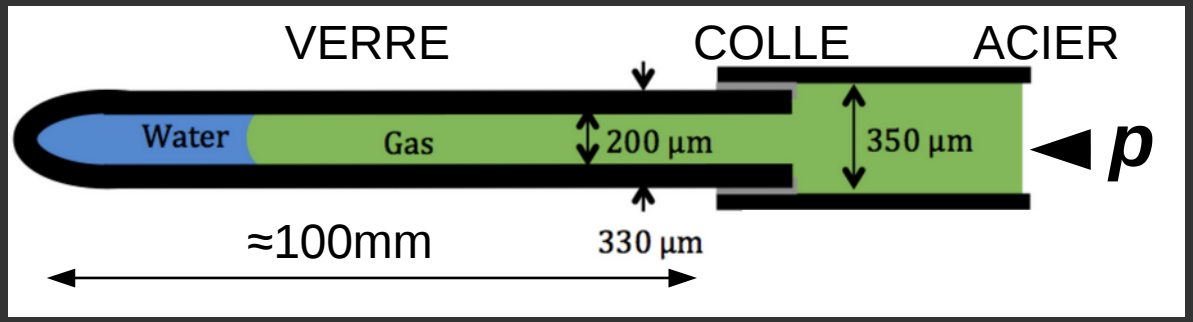
- $\sigma_{rupture}$ ≈ 70 à 200MPa (masse) (fibres)



Notre domaine de travail

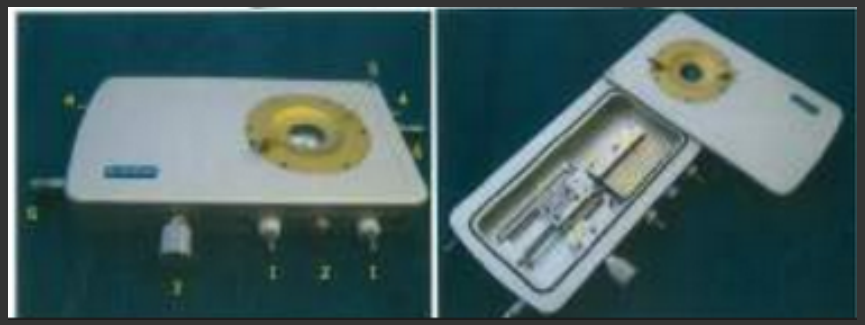


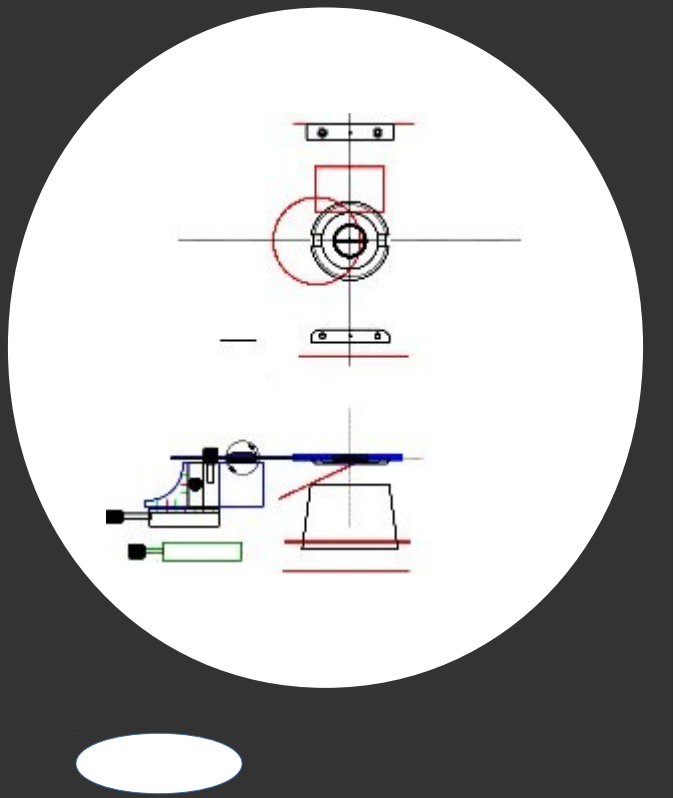
II COMMENT ? - FORTS MAIS IL NE FAUT PAS POUSSER !



Capillaire tenu à **UNE** extrémité

Bloc thermostaté

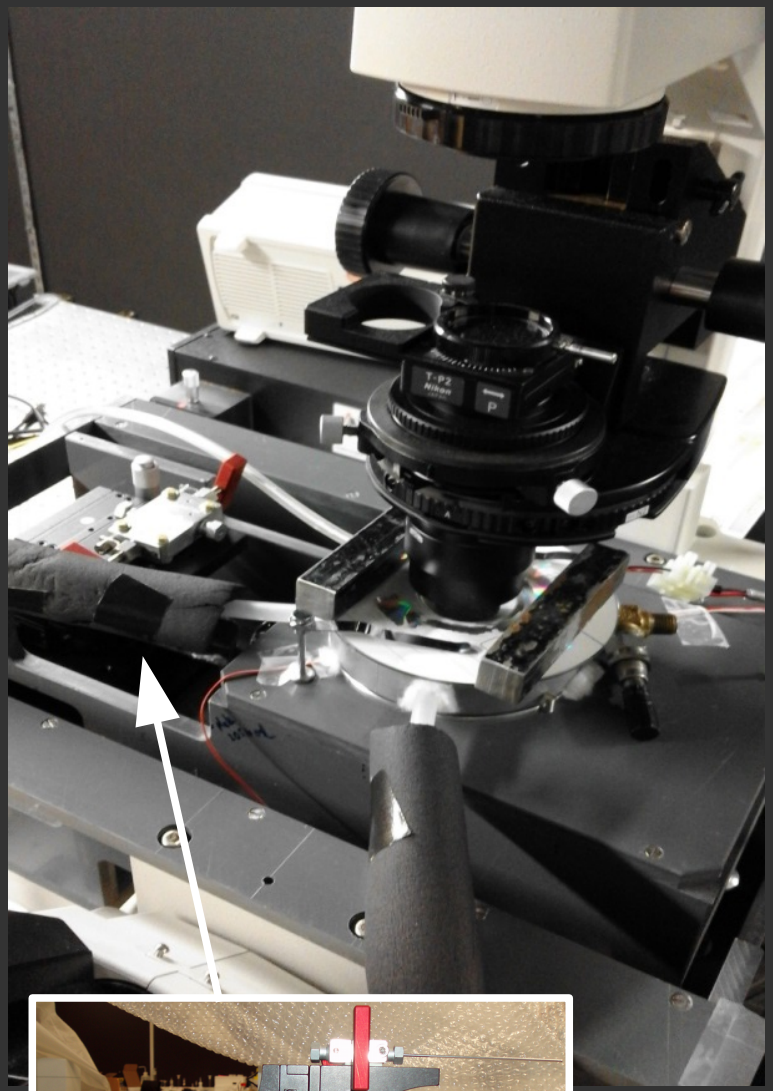


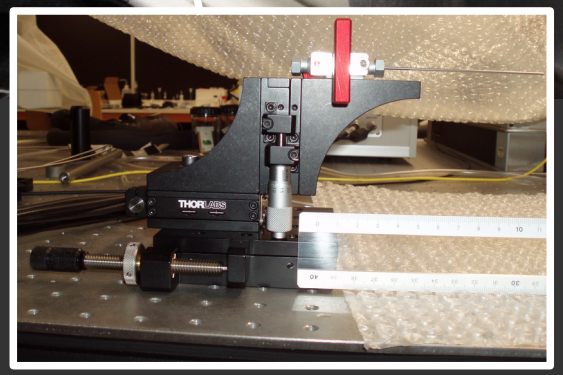


Solution commerciale (~5--10k€)

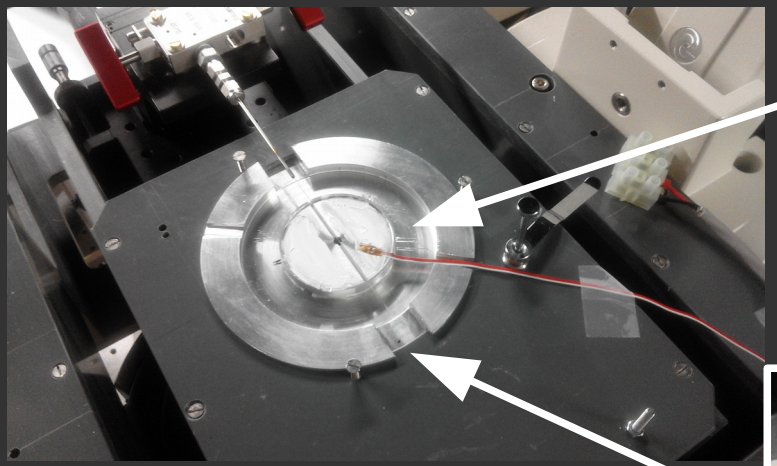
Ne satisfait pas toutes les contraintes ==>

II COMMENT ? PLATINE *AD HOC*

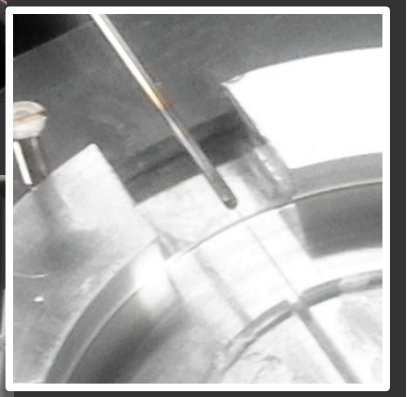


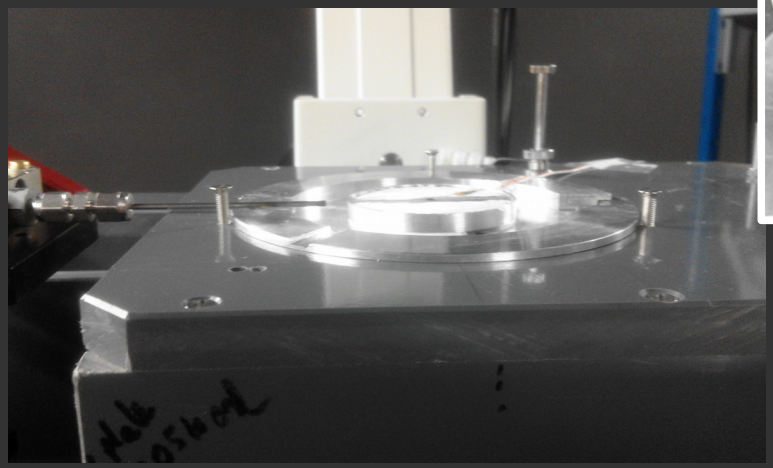


Pompe ISCO
Vanne haute pression 3-voies



Pt100Ω +
Peltier





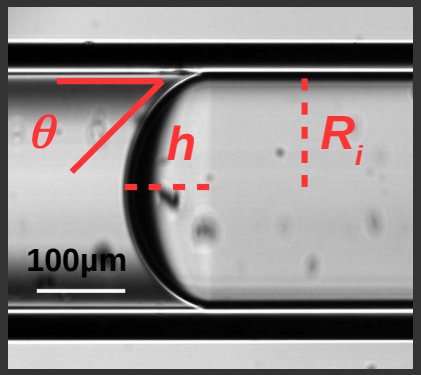
330µm OD.
capillary/
Steel tube
500µm
ID !!

(COUVERCLE RETIRÉ)

-Suspension à 1 point
-Micromanipulation xyz
-Compatible transport + chambre à gants

III EXEMPLES

III EXEMPLES ANGLE DE CONTACT : TIRER PROFIT D'UN INCONVÉNIENT DES TUBES RONDS



LIQUIDE GAZ
MOUILLANT

(TRANSMISSION)

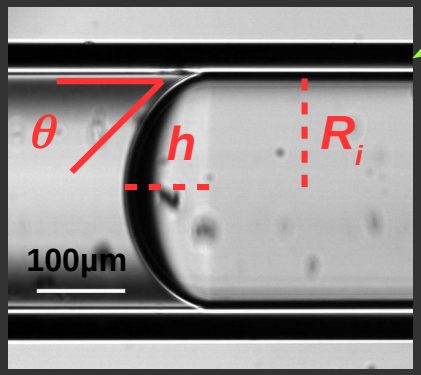
-Le tube = **une loupe cylindrique** => grossissement latéral variable

- $R_i < (\sigma/g\Delta\rho)^{1/2}$, longueur capill.re => **calotte sphérique =>**

$$\tan\theta = (R_i^2 - h^2)/(2R_i h)$$

III EXEMPLES ANGLE DE CONTACT : TIRER PROFIT D'UN INCONVÉNIENT DES TUBES RONDS

CAUSTIQUE INTERNE



LIQUIDE GAZ
MOUILLANT
(TRANSMISSION)

-Le tube = **une loupe cylindrique** => grossissement latéral variable

- $R_i < (\sigma/g\Delta\rho)^{1/2}$, longueur capill.re => **calotte sphérique =>**

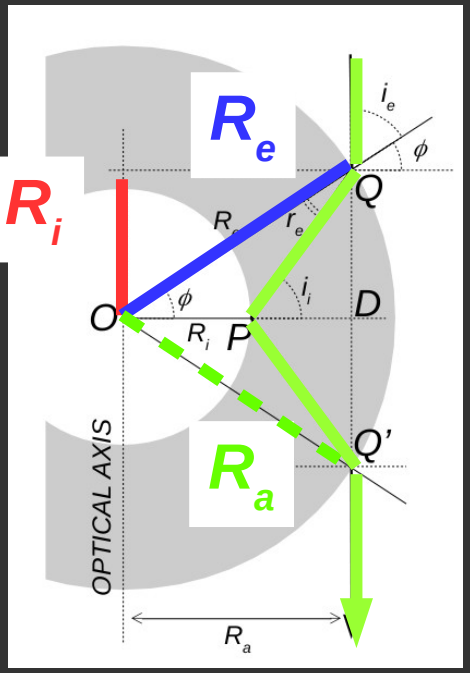
$$\tan\theta = (R_i^2 - h^2)/(2R_i h)$$

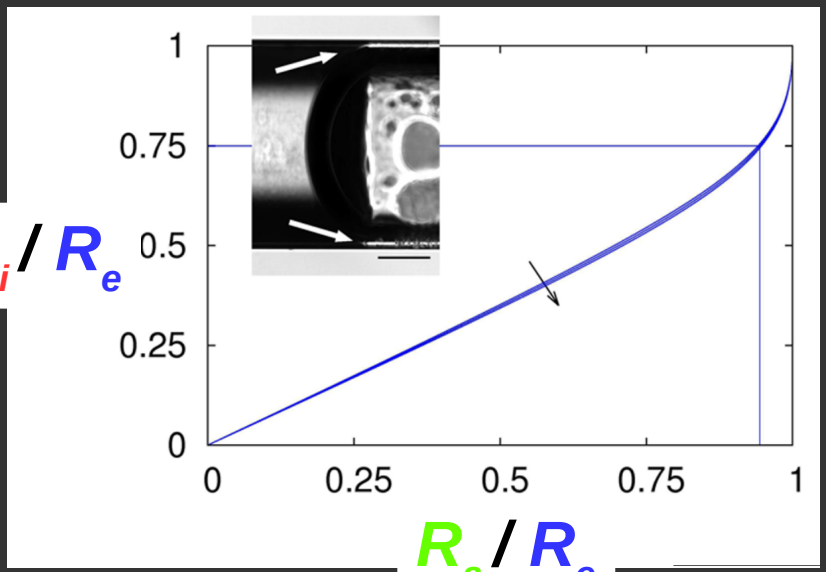
-Correction du rayon interne

a little algebra leads to the final relation:

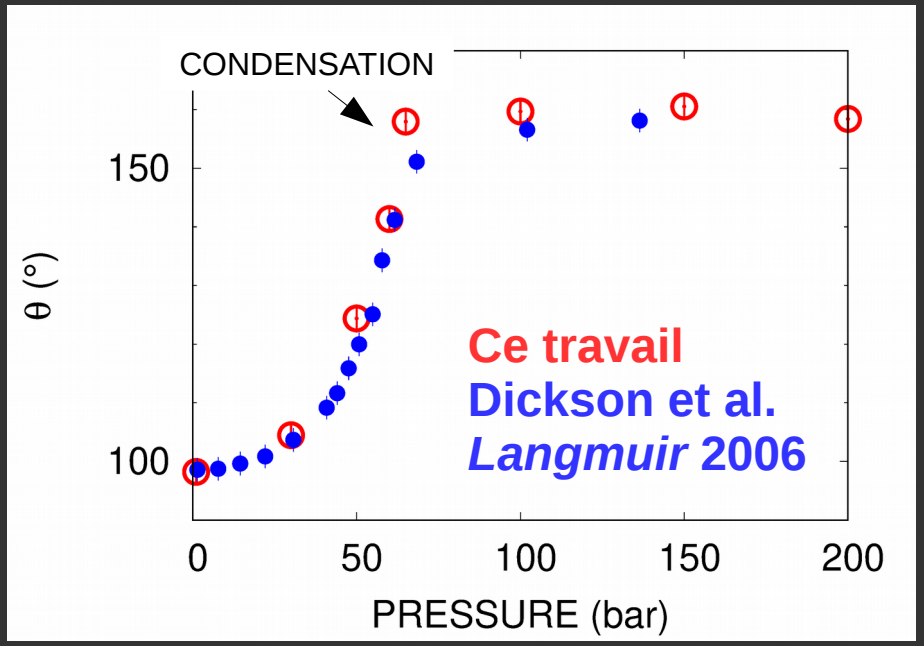
$$R_i/R_e = \frac{R_a/R_e}{n\sqrt{1 - R_a^2/R_e^2}\sqrt{1 - R_a^2/n^2R_e^2} + R_a^2/R_e^2} \quad (7)$$

DOI: 10.1021/acs.langmuir.7b01025
Langmuir 2017, 33, 5179−5187

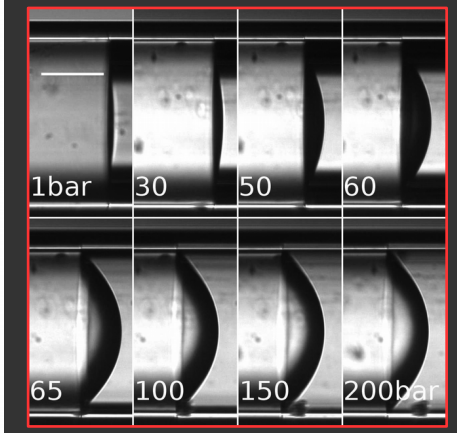




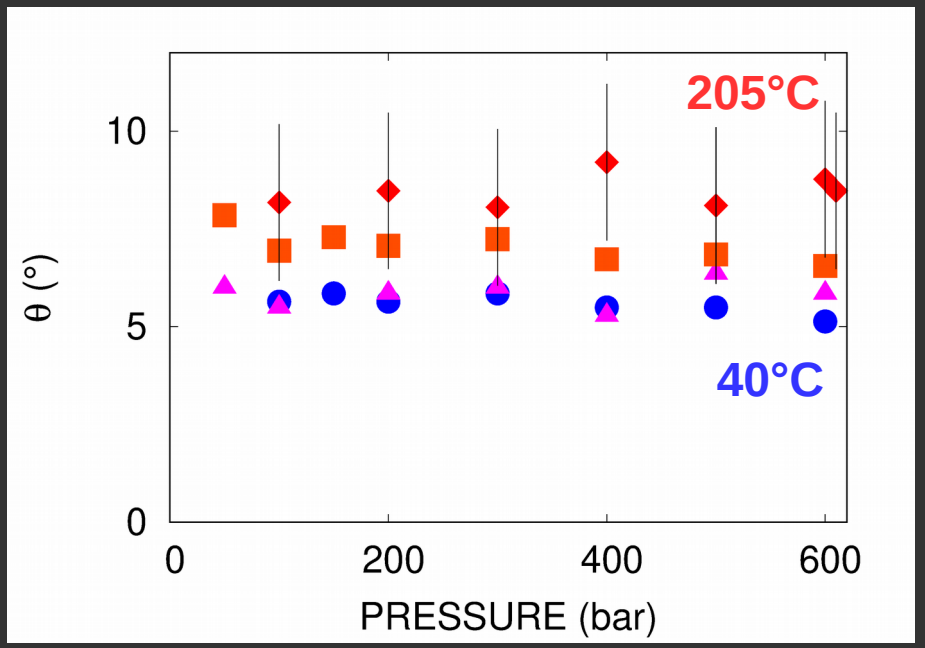
III EXEMPLES ANGLE DE CONTACT EN CONDITIONS SÉVÈRES



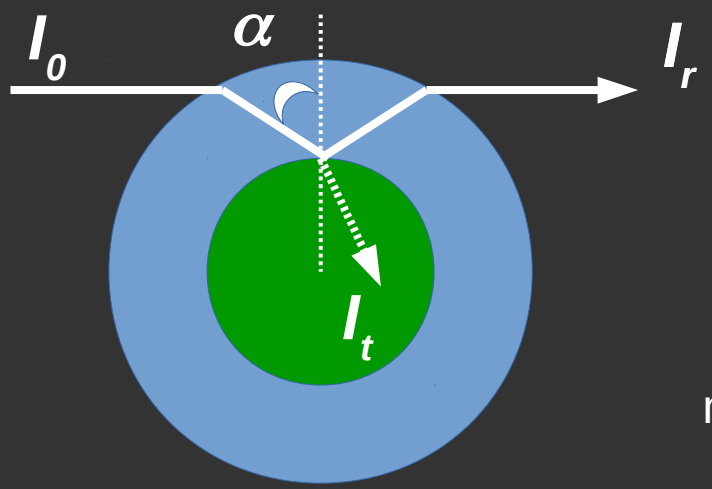
VALIDATION $\theta_{CONTACT}$ **EAU-CO_2**
SUR VERRE « **HYDROPHOBE** » (SILANISÉ)
***p*≤200atm *T*≤22°C**

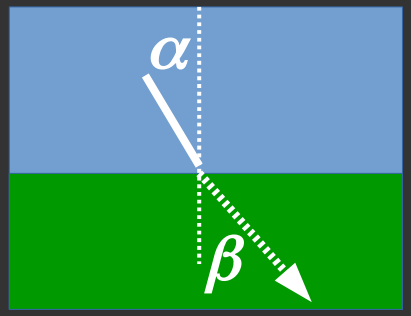


CONDITIONS **SÉVÈRES**
$\theta_{CONTACT}$ EAU-CO_2
SUR VERRE **ORDINAIRE**
***p*≤600atm *T*≤205°C**

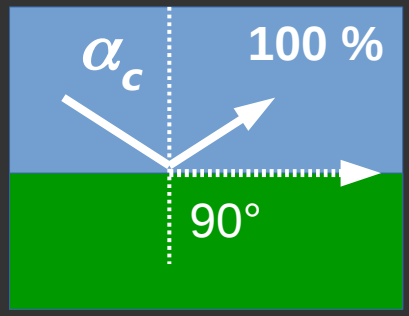


III EXEMPLES FILMS MOUILLANTS : TIRER PROFIT D'UNE RÉFLXION TOTALE INTERNE





$n_{verre} \times \sin(\alpha) = n_{fluide} \times \sin(\beta)$



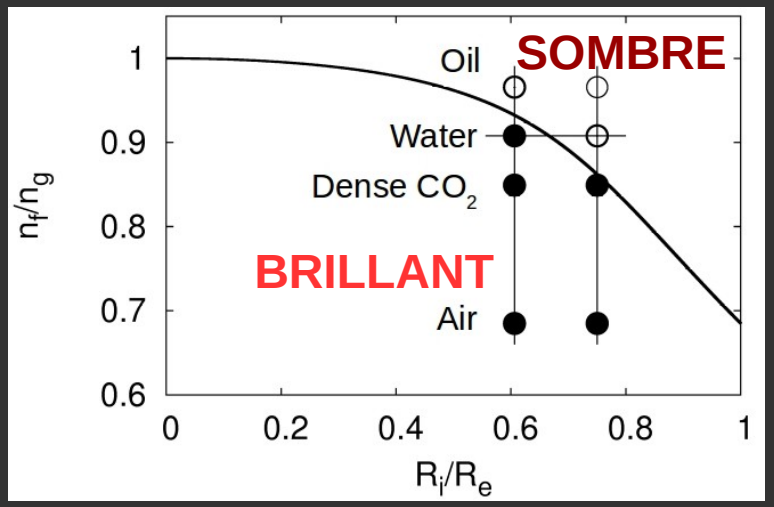
$\sin(\alpha_c) = n_{fluide} / n_{verre}$

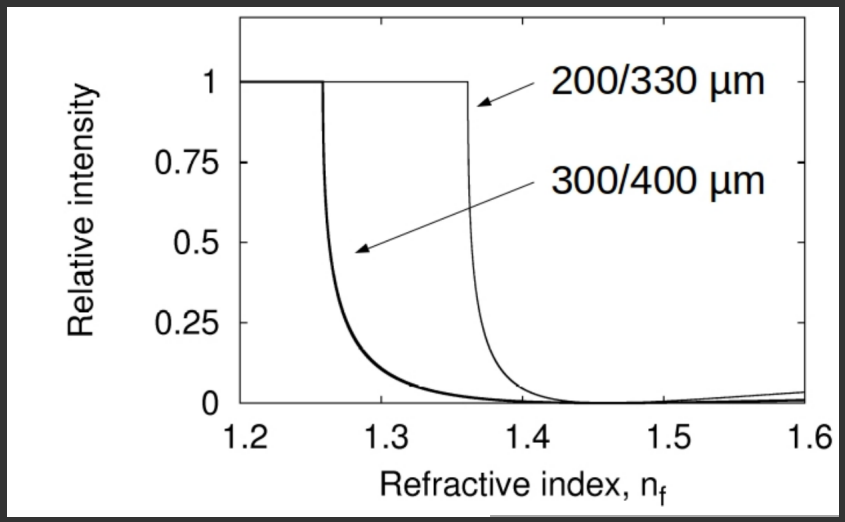
RÉFLEXION TOTALE

α imposé par R_i, R_e, n_{verre} => Intensité de la caustique = $I_r(R_i, R_e, n_{verre}, n_{fluide})$

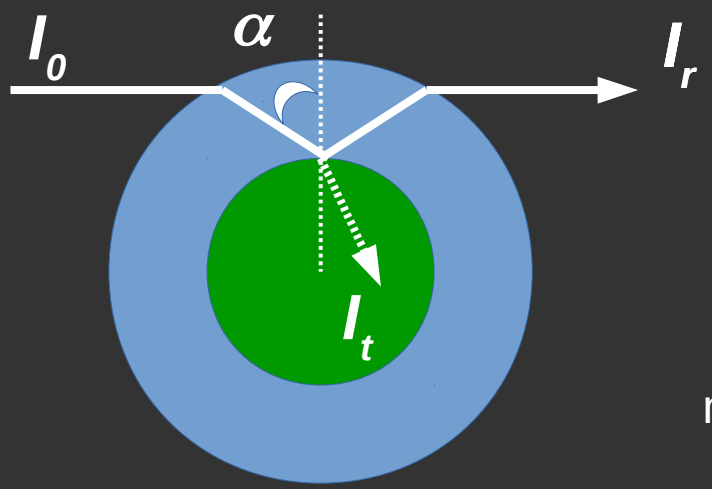
(lois de Fresnel)

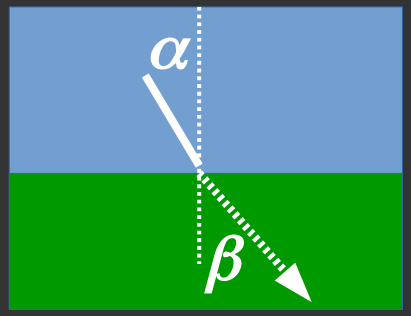
$$I_r = I_r(n_{fluide})$$



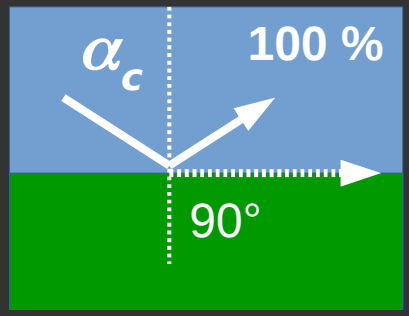


III EXEMPLES FILMS MOUILLANTS : TIRER PROFIT D'UNE RÉFLXION TOTALE INTERNE





$n_{verre} \times \sin(\alpha) = n_{fluide} \times \sin(\beta)$



$\sin(\alpha_c) = n_{fluide} / n_{verre}$

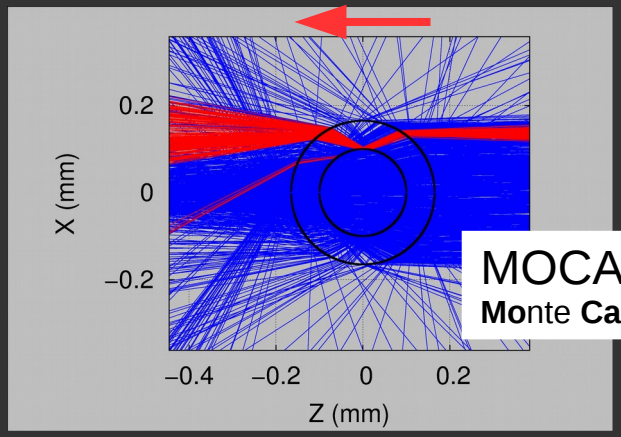
RÉFLEXION TOTALE

α imposé par R_i, R_e, n_{verre} => Intensité de la caustique = $I_r(R_i, R_e, n_{verre}, n_{fluide})$

(lois de Fresnel)

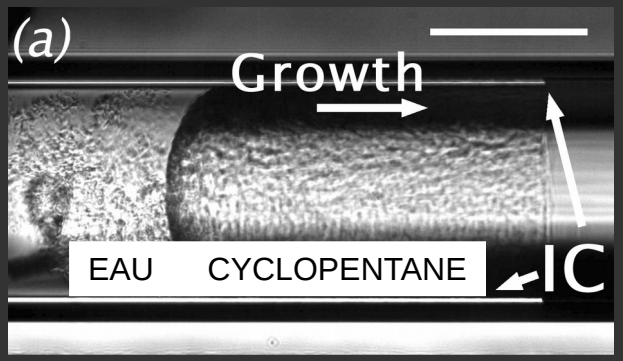
$$I_r = I_r(n_{fluide})$$

???!!



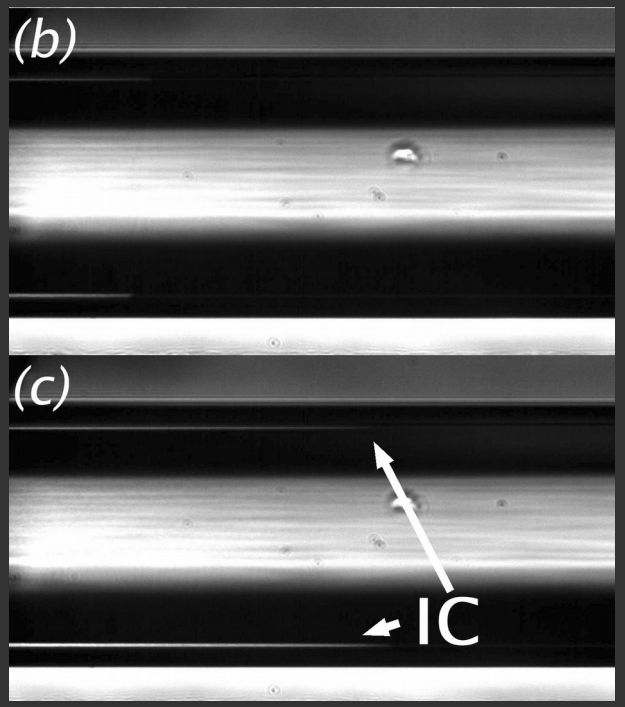
MOCARTSI 1.3
Monte **Car**lo Ray **T**racing **Si**mulation

III EXEMPLES FILMS MOUILLANTS : TIRER PROFIT D'UNE RÉFLXION TOTALE INTERNE



CROISSANCE D'UNE PELLICULE (≈1-10µm) d'hydrate de cyclopentane
***T* ≈ 2°C, *p*=1bar**

TEMPS ~ 200s

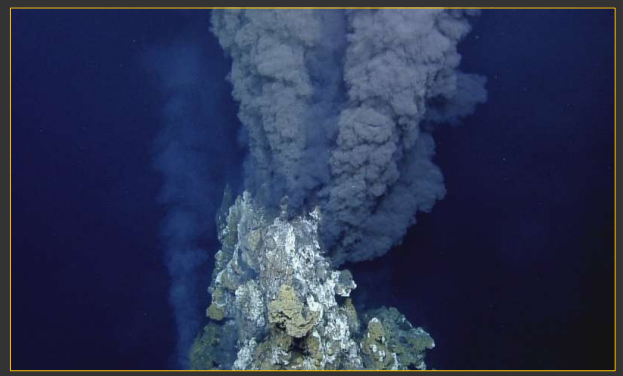


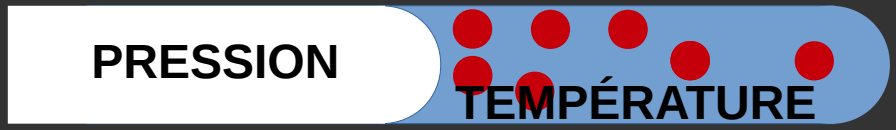
POSITION ~ 500µm

Hobeika *et al* *Langmuir* **33** (2017) 5179-5187

III EXEMPLES VIDÉO-MICROSCPOPIE DE MICROORGANISMES EN CONDITIONS EXTRÊMES (capillaire carré)

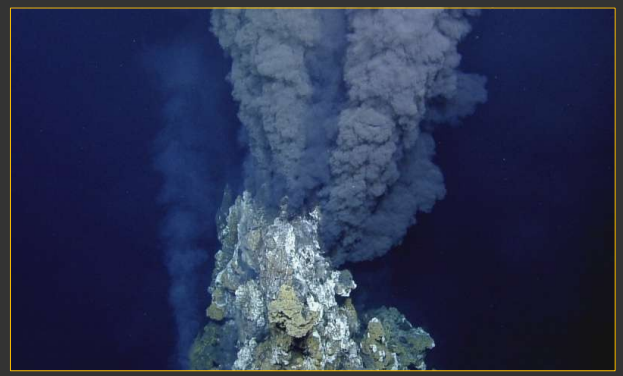
-Observer directement l'écologie en conditions *in situ*



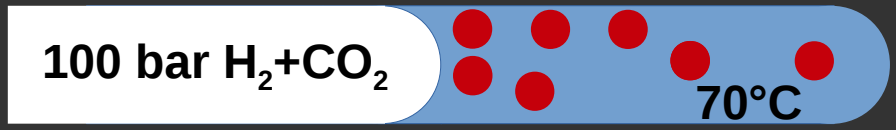


III EXEMPLES VIDÉO-MICROSCPOPIE DE MICROORGANISMES EN CONDITIONS EXTRÊMES (capillaire carré)

-Observer directement l'écologie en conditions *in situ*



1er modèle



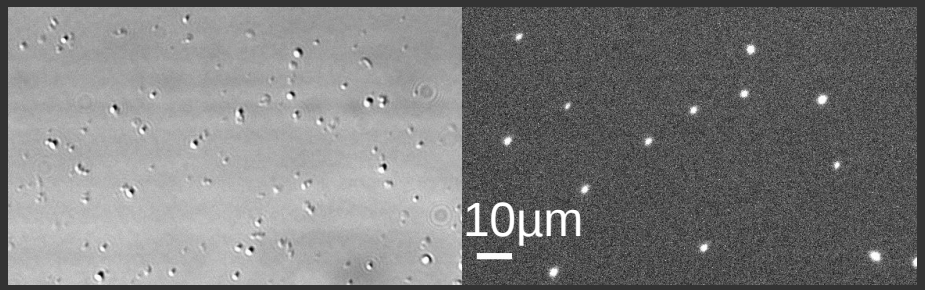
Methanocaldococcus villosus

-produit le CH_4
-coque, ronde ~1-2µm
-auto-fluorescente

+

Thermodesulfatator atlanticus

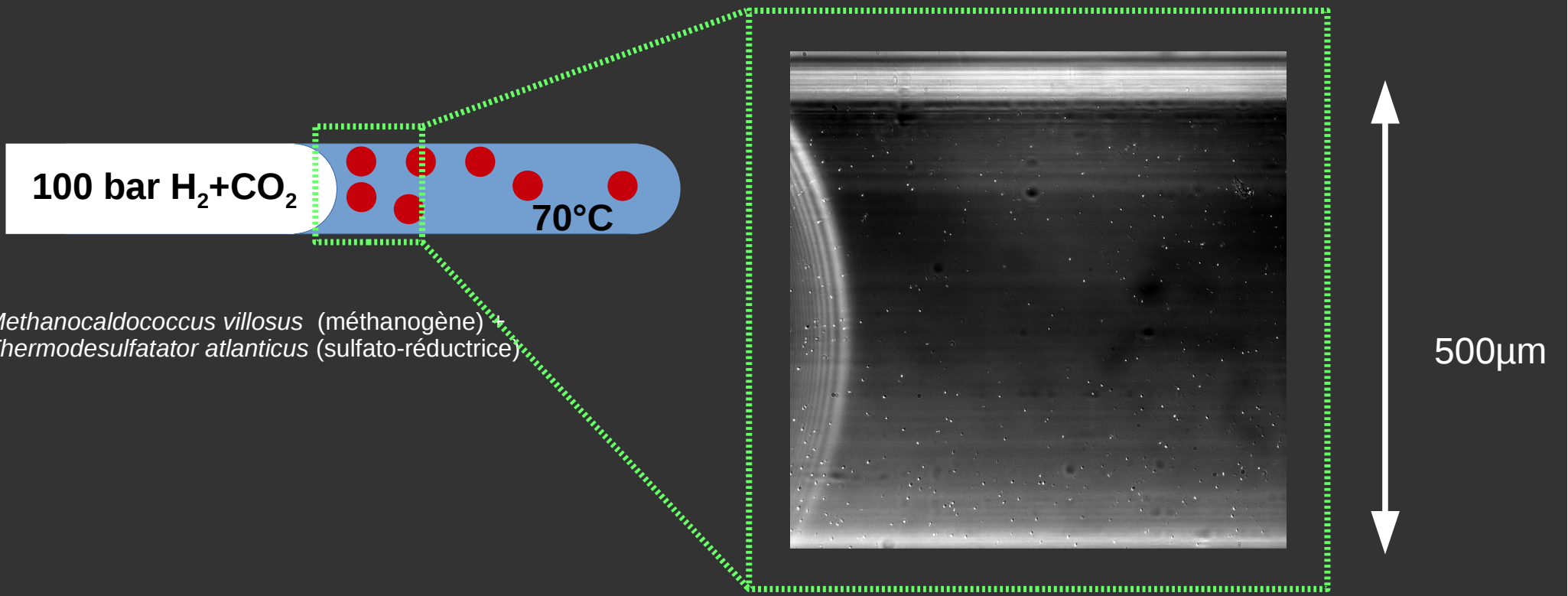
-bacille
-consomme le CH_4
-non-fluorescente
-allongée ~2µm



CONTRASTE DE PHASE DIC
Les deux

FLUORESCENCE
Co-facteur F420 de l'archée

III EXEMPLES VIDÉO-MICROSCPOPIE DE MICROORGANISMES EN CONDITIONS EXTRÊMES (capillaire carré)



Methanocaldococcus villosus (méthanogène) +
Thermodesulfatator atlanticus (sulfato-réductrice)

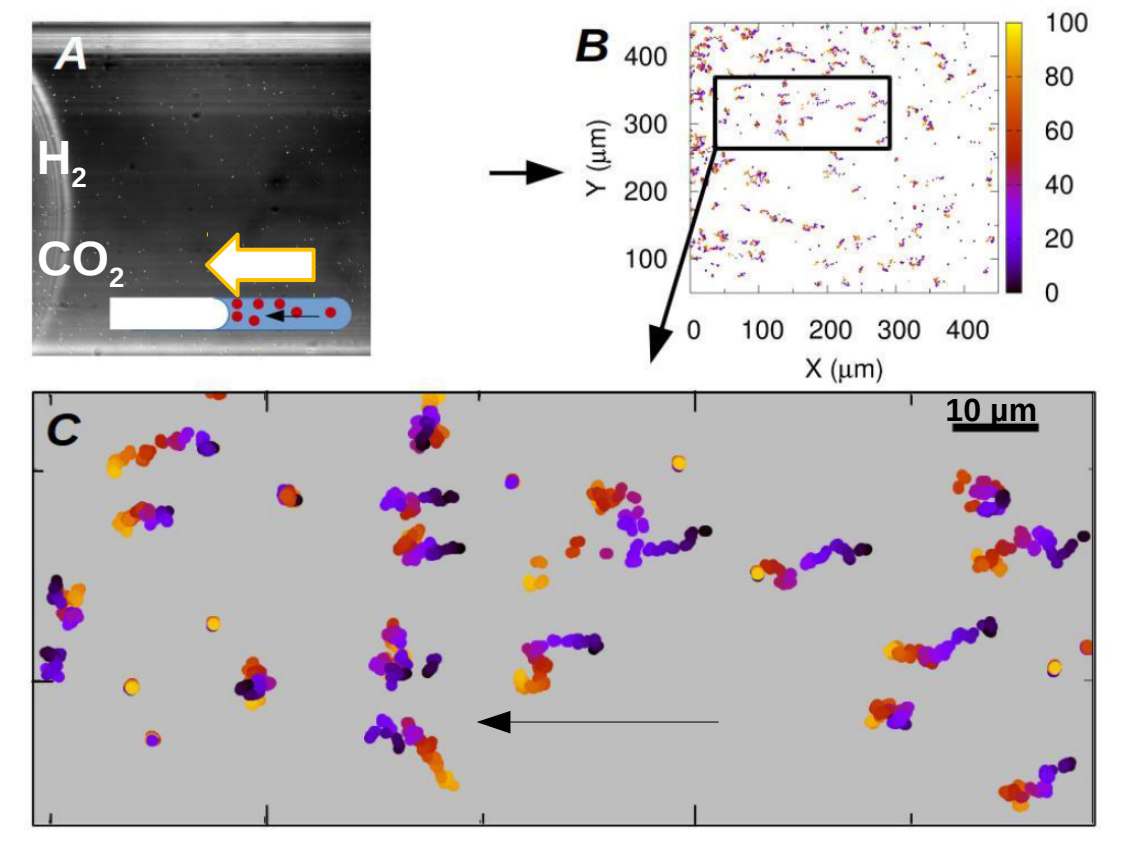
III EXEMPLES VIDÉO-MICROSCPOPIE DE MICROORGANISMES EN CONDITIONS EXTRÊMES (capillaire carré)

Temps (s)

Analyse de trajectoires
Localisation à ≤ 50nm
(*Icy*, Inst. Pasteur)

=>

étude comportmentale
en conditions extrêmes

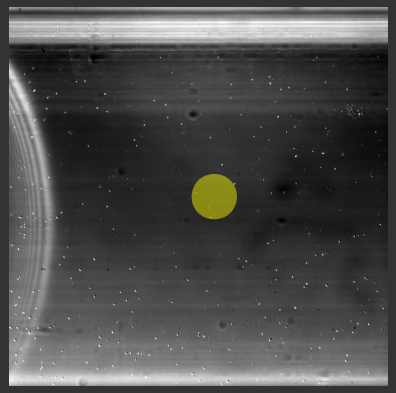


Les méthanogènes se déplacent vers la source de nourriture

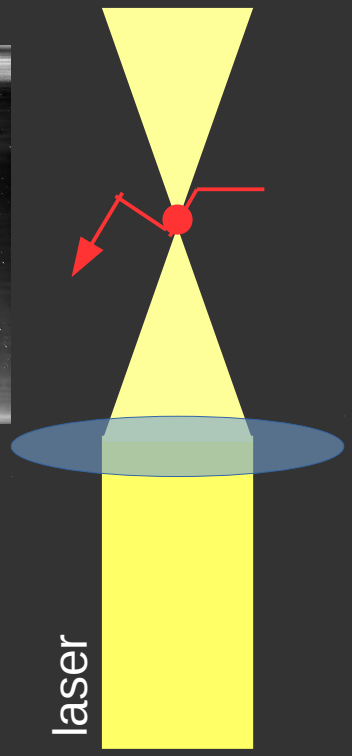
III EXEMPLES SPECTROSCOPIE RAMAN (capillaire carré)

+ université de BORDEAUX — ISM Institut des Sciences Moléculaires BORDEAUX

Thierry Tassaing
Arnaud Desmedt
Laurent Servant

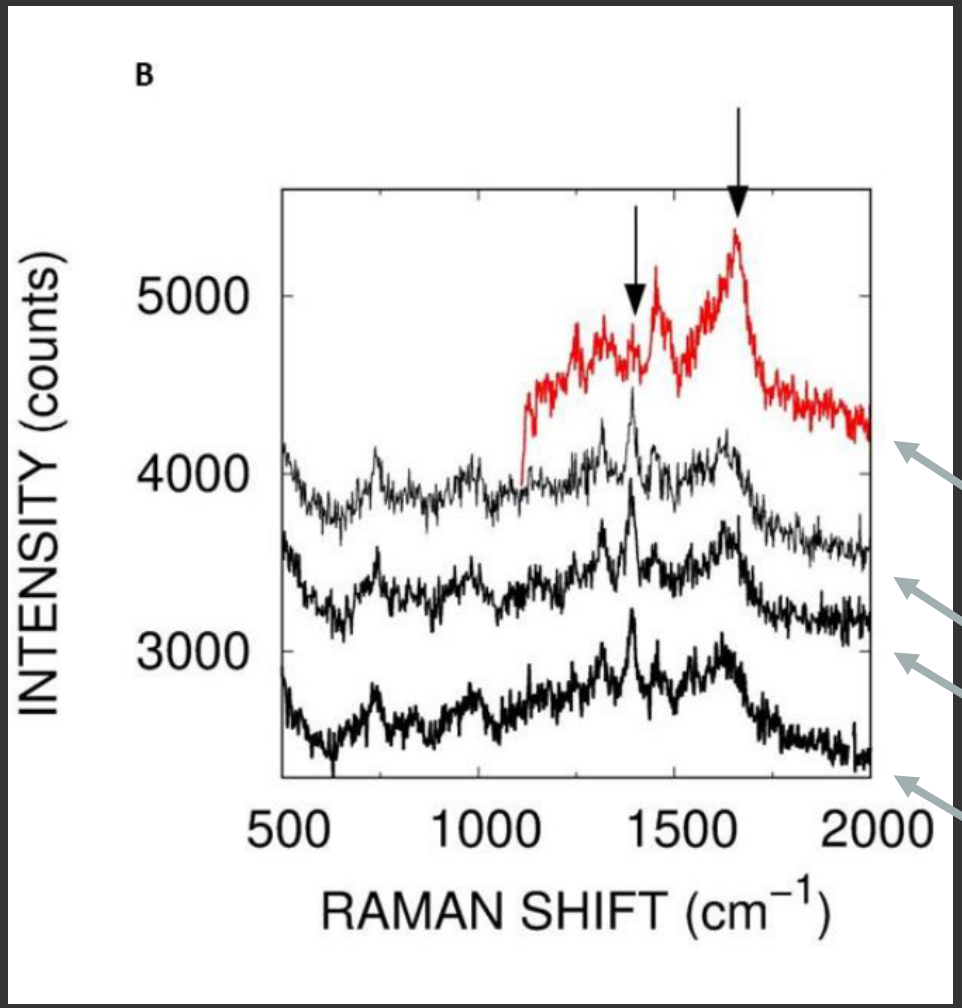


PLAN



COUPE

Ramna de micro-organismes vivants



Cellule méthanogène

Cellule BSR 1

Cellule BSR 2

Cellule BSR 3

Répétabilité

Différenciation

LE STADE 0 DE LA MICROFLUIDIQUE :

MICRO-CAPILLAIRES SILICE/BOROSILICATE:

-très solides, pris « dans le sens du poil »

-formes et sections variées

-bonne qualité optique

-surfaces modifiables

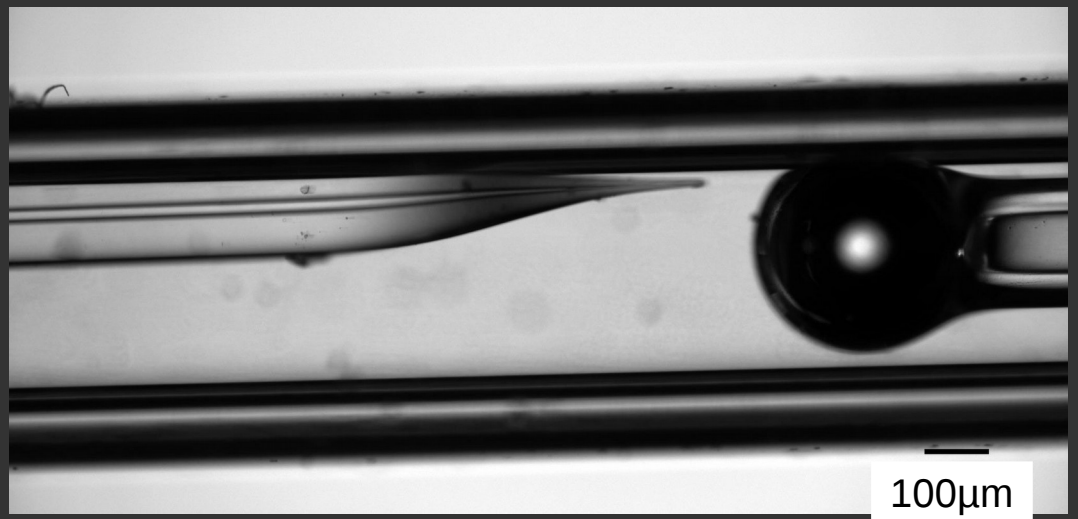
-pas chers

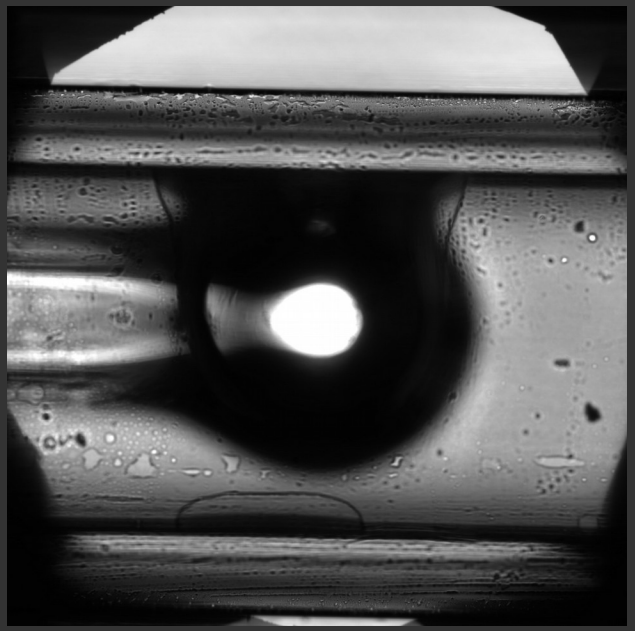
MERCI !

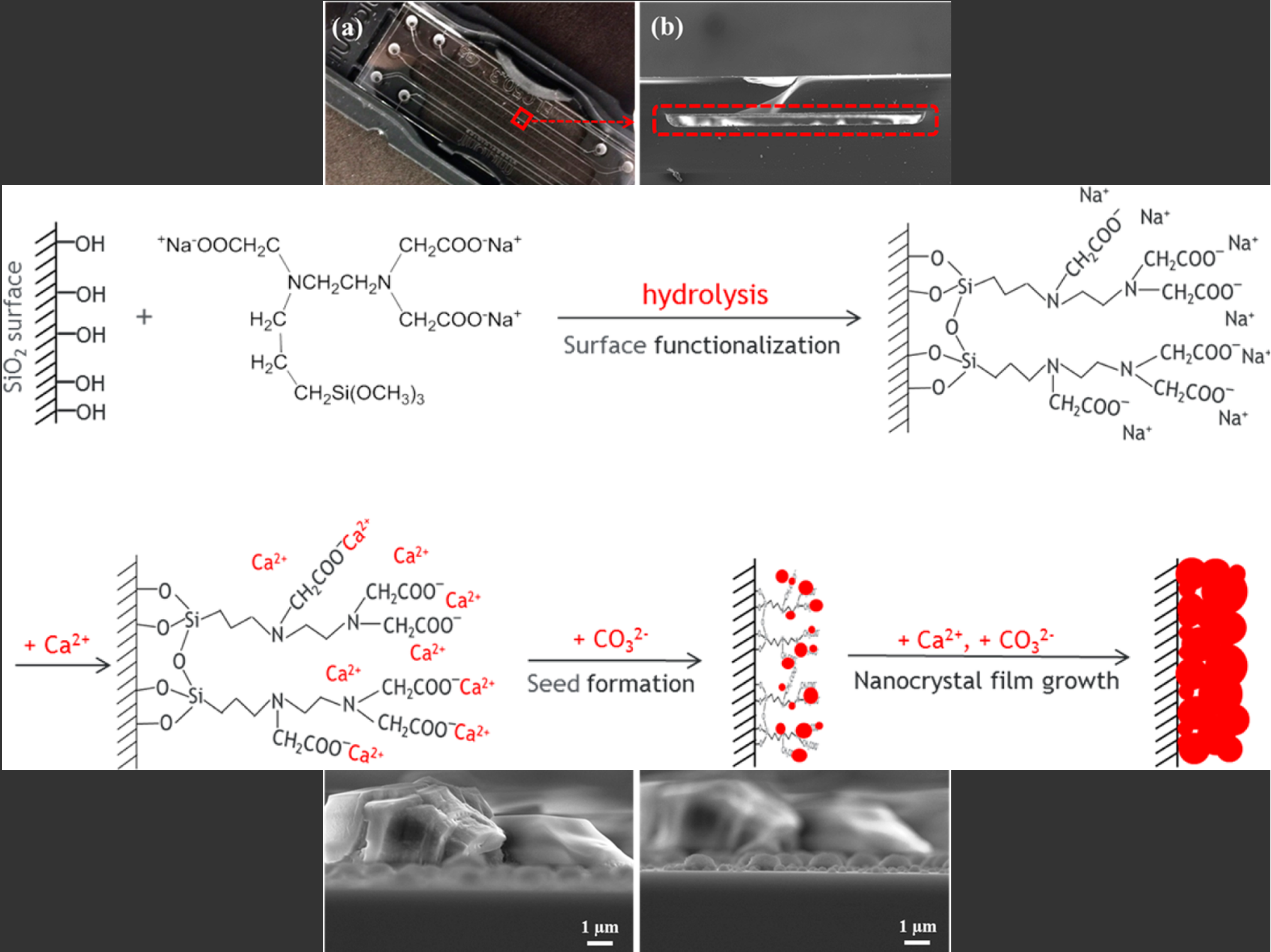
Hobeka *et al. Langmuir* **33** (2017) 5179−5187

Touilh et al *Langmuir* **33** (2017) 10965–10977

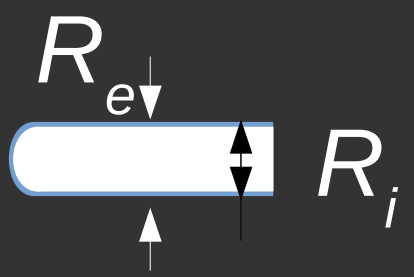
Caumon *et al.* *Eur. J. Mineralogy* **25** (2013) 755-763


100µm





(a)
(b)
SiO2 surface
OH
+
+Na-OOCH2C
CH2COO-Na+
NCH2CH2N
H2C
CH2COO-Na+
H2C
CH2Si(OCH3)3
hydrolysis
Surface functionalization
Na+
+ Ca2+
+ CO32-
Seed formation
+ Ca2+, + CO32-
Nanocrystal film growth
1 μm
1 μm


R_e
R_i

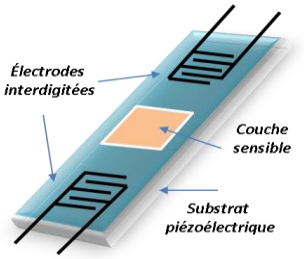
Développement de capteurs acoustiques à ondes de surface pour le monitoring des structures en béton

iemn
Institut d'Electronique, de Microélectroi
et de Nanotechnologie
UMR CNRS 8520

cnrs

Université Polytechnique HAUTS-DE-FRANCE

Interreg
France-Wallonie-Vlaanderen
UNION EUROPÉENNE
EUROPESE UNIE
CUBISM



- ✓ Pr Marc DUQUENNOY
- ✓ Thèse de Saliou NDAO
- ✓ M. Ouaftouh, N. Smagin

Projet "CUBISM" & Problématiques

Monitoring des structures en béton

- **Séchage des bétons réfractaires**

Absence d'outil de monitoring du cycle de séchage : Pression & Humidité

- **Suivi de l'humidité des structures pour le Génie Civil**

Absence de capteur autonome, sans fil, insensible à l'eau liquide

Projet "CUBISM" & Problématiques

Monitoring des structures en béton

❖ **Séchage des bétons réfractaires**

Coulage et Séchage

Volumes très importants

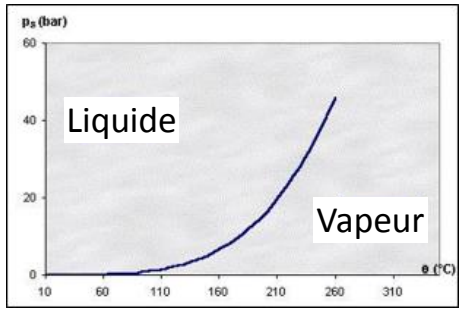
Danger s'il reste de l'eau lors de la mise en service

En service…

Tp° ↗

Relation de Clapeyron:

$$P_{vs} = P_0 e^{\frac{\Delta H}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)}$$



Explosion

et

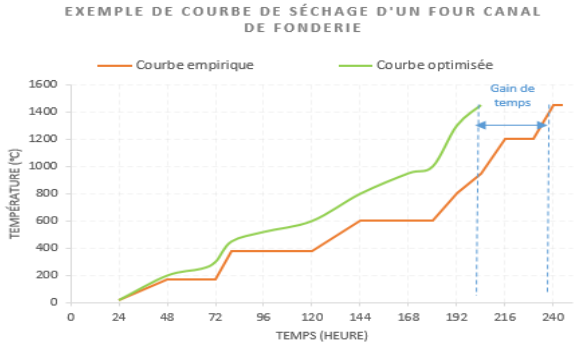
Ruine de la structure

Projet "CUBISM" & Problématiques

Monitoring des structures en béton

❖ **Séchage des bétons réfractaires**

Absence de capteur approprié
Csq: Exagération des temps de séchage



Objectifs:

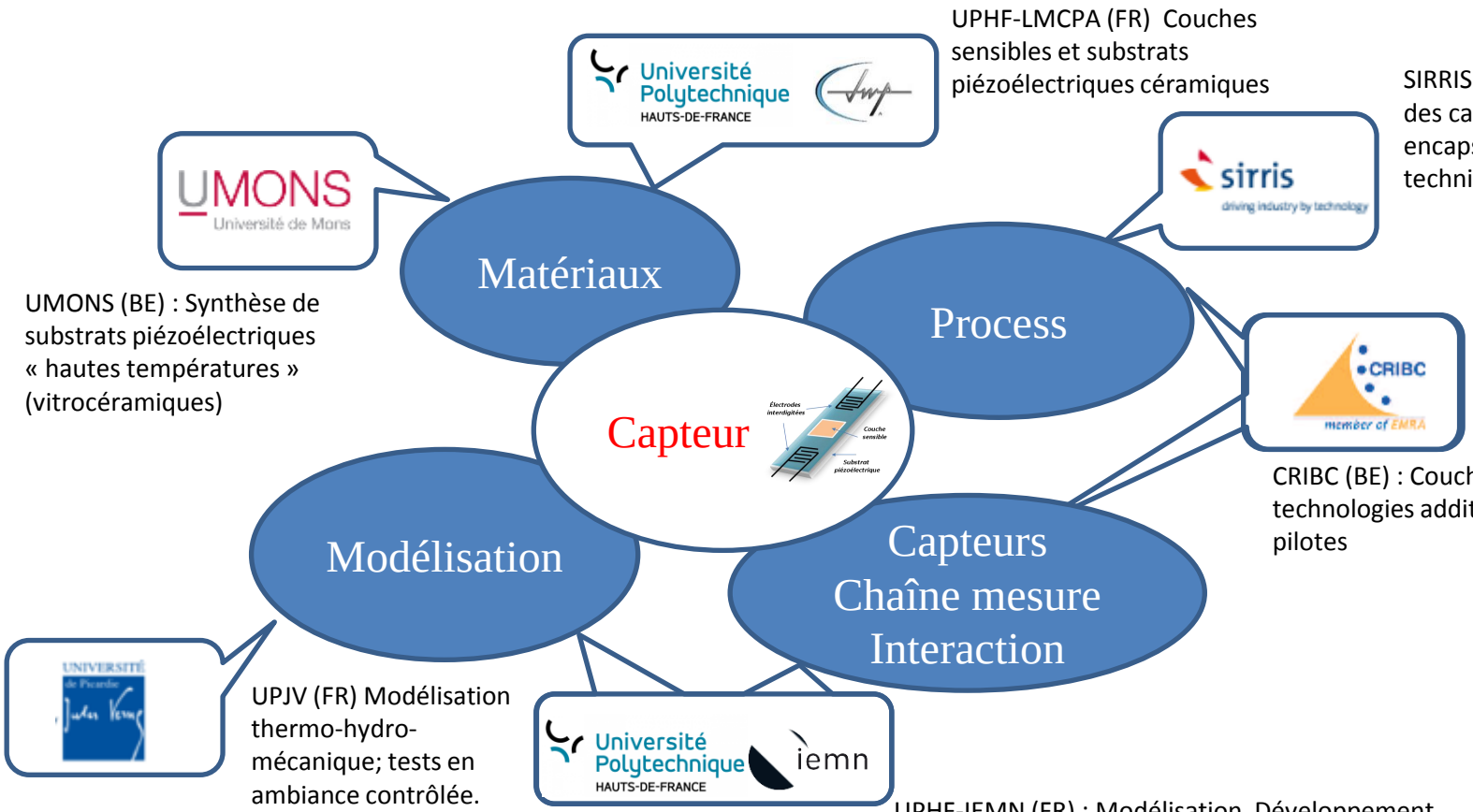
Réduction du temps de séchage
+
S'assurer qu'il ne reste plus d'humidité avant une première mise en service (risque d'explosion)

❖ **Deux types de capteurs proposés basés sur les ondes acoustiques de surface**

Béton réfractaire	Béton génie civil
• Haute température (500°C) • Forte pression • Mesure de traces d'humidités • Mesure limitée dans le temps (15 jours) • Bon marché car noyés dans le béton.	• Température ambiante • Fort taux d'humidité (parfois eau liquide) • Mesure sur de longues périodes • Bon marché à demeurer dans les structures • Sans fil

Projet "CUBISM" & Problématiques

Partenariat pluridisciplinaire d'équipes de recherche transfrontalières



Principe de fonctionnement des capteurs IDT

Utilisation des ondes acoustiques (ultrasonores) de surface

Ondes acoustiques de surface ou Onde de Rayleigh

Surface Acoustic Wave : SAW

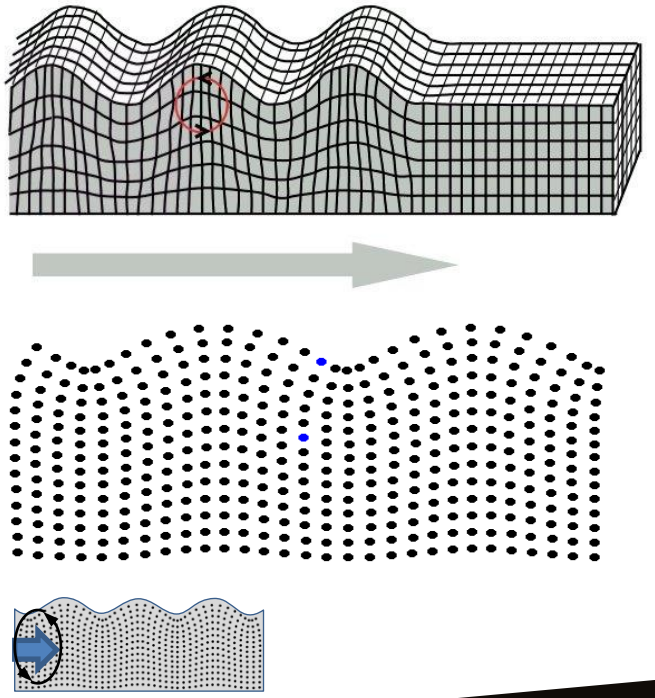
Seismologic surface acoustic wave

San Francisco, City Hall

April 17, 1906

April 18, 1906

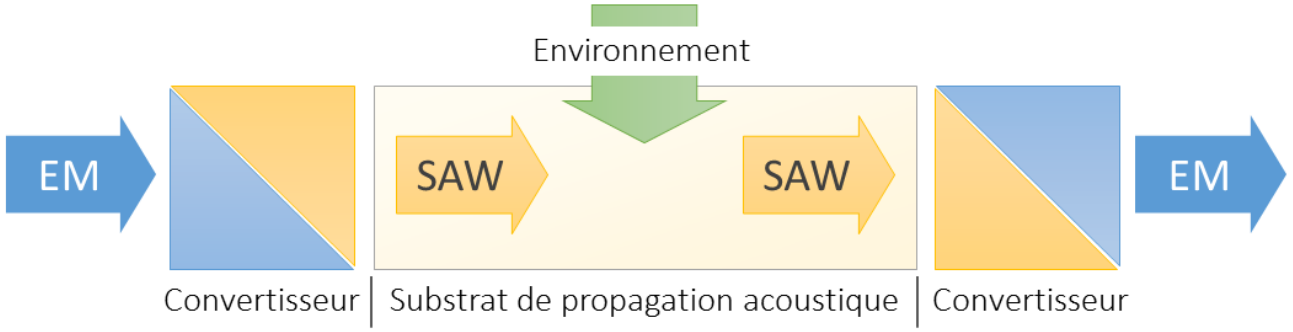
Rayleigh Wave



Principe de fonctionnement des capteurs IDT

Utilisation des ondes acoustiques (ultrasonores) de surface

Schéma de fonctionnement



Ondes électromagnétiques (EM) **vs** ondes acoustiques de surface (SAW)

$V_{EM} \sim 3 \cdot 10^8$ m/s

$V_{SAW} \sim 3000$ m/s

$V_{SAW} \approx V_{EM} \cdot 10^{-5}$

	f = 10 MHz	f = 1 GHz
λ_{SAW}	300 µm	3µm
λ_{EM}	30 m	0,3 m

$f \cdot \lambda = V$

Pour τ_D = 20 µsec

$L_{SAW} \approx 6$ cm

$L_{COAX} \approx 4{,}8$ km

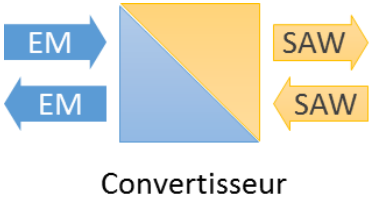
Applications

1. Propagation lente – **lignes de retard**
2. Conversion très précise et sélective – **filtres sélectifs**
3. Accès directe à l'onde élastique – **capteurs** et unités de **traitement de signal**

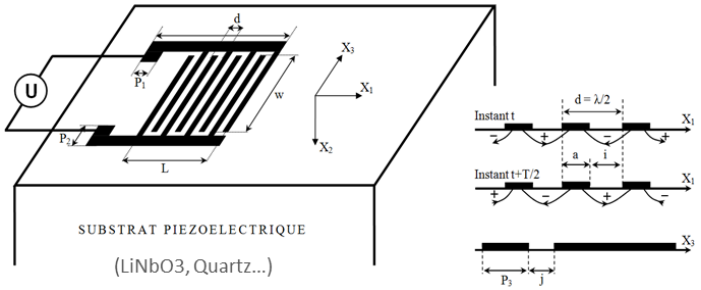
Principe de fonctionnement des capteurs IDT

Génération des ondes de surface par Capteurs IDT-SAW

- **IDT pour électrodes interdigitées**
- 2 électrodes métalliques en forme de peigne sont déposées sur un substrat piézoélectrique



Convertisseur



Fréquence de résonnance définie par :

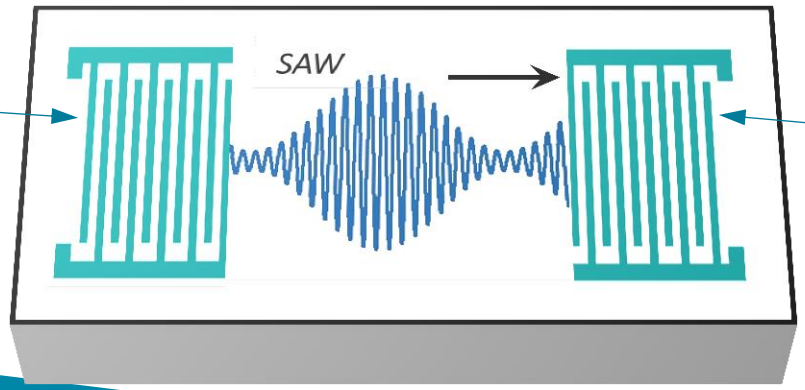
$$f_0 = \frac{V_R}{2.d} = \frac{V_R}{\lambda} \text{ avec } d = \frac{\lambda}{2}$$

- d : périodicité
- λ : longueur d'onde SAW à f_0
- V_R : vitesse de propagation des ondes SAW dans le substrat

---

Capteur IDT

Transducteur interdigité (IDT) Emetteur



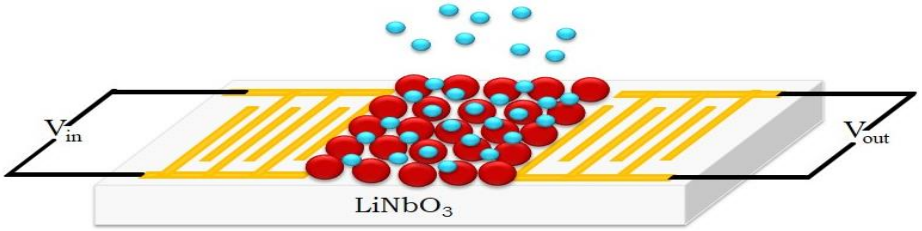
Transducteur interdigité (IDT) Récepteur

Principe de fonctionnement des capteurs IDT

Fonctionnalisation des Capteurs IDT-SAW

- Des couches sensibles à l'humidité sont placées entre l'IDT émetteur et l'IDT récepteur afin de fonctionnaliser le capteur vis-à-vis de l'humidité.

Capteur IDT de base

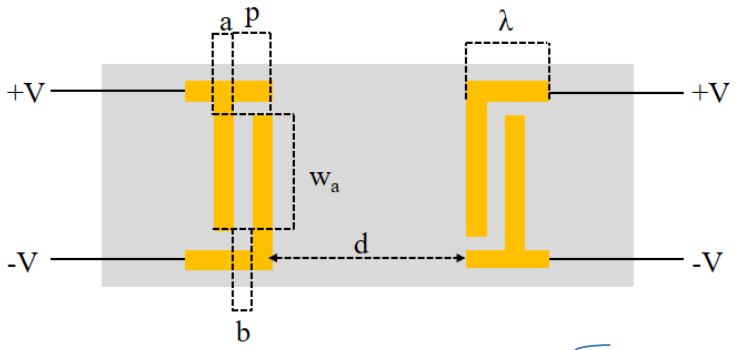


Capteur IDT avec couche sensible à l'humidité

Optimisation des capteurs IDT: Caractéristiques électriques

- Optimisation du design des électrodes des transducteurs IDT : nombre de paires d'électrodes, largeur de recouvrement, etc.

- Modélisation des caractéristiques électriques en utilisant le formalisme de Smith (parallèle).



$$G(f) = \pi^2 k^2 N^2 w_a f_0 C_1 \left(\frac{\sin(x)}{x}\right)^2$$

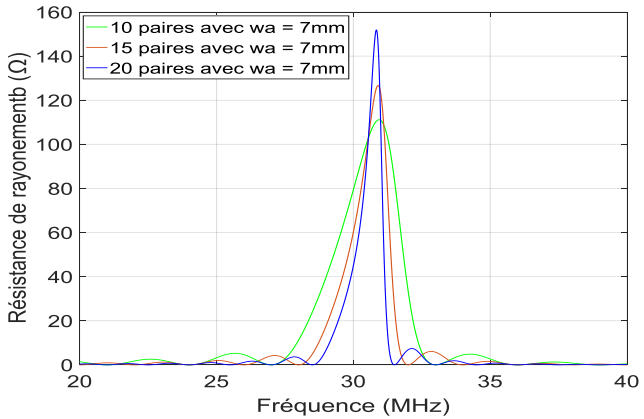
$$x = N\pi \frac{f - f_0}{f_0}$$

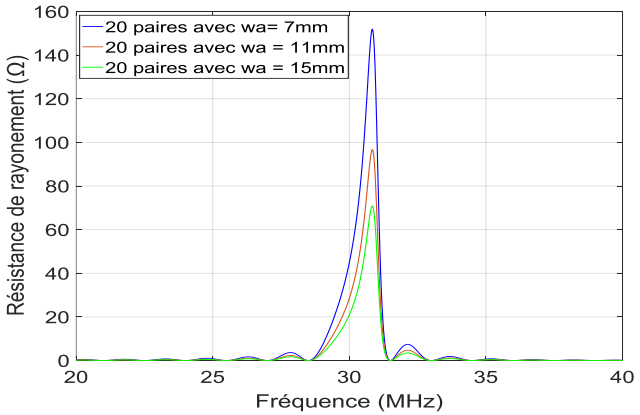
$$C_1 = (\varepsilon_p + \varepsilon_0) \frac{\mathrm{K}(\sin(\eta\frac{\pi}{2}))}{\mathrm{K}(\cos(\eta\frac{\pi}{2}))}$$

Optimisation des capteurs IDT: Caractéristiques électriques

- Optimisation du design des électrodes des transducteurs IDT : nombre de paires d'électrodes, largeur de recouvrement, etc.

Exemple: évolution de l'impédance pour des capteurs fonctionnant aux alentours de 30MHz.





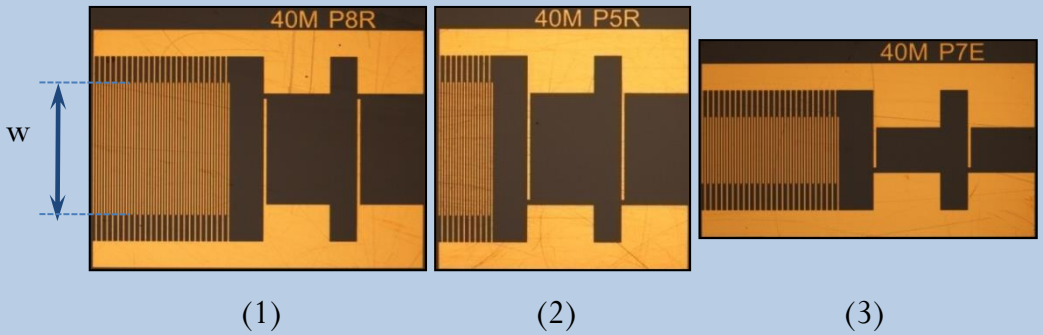
Fréquence (MHz)	Nombre de paires	Wa (mm)	Résistance (Ω)	BP (MHz)
30	10	7	112	2,65
30	15	7	127	1,77
30	20	7	152	1,33
30	20	11	97	1,33
30	20	15	71	1,33

Réalisation des capteurs IDT

Faibles largeurs des électrodes !

Exemples de peignes de 40 MHz :

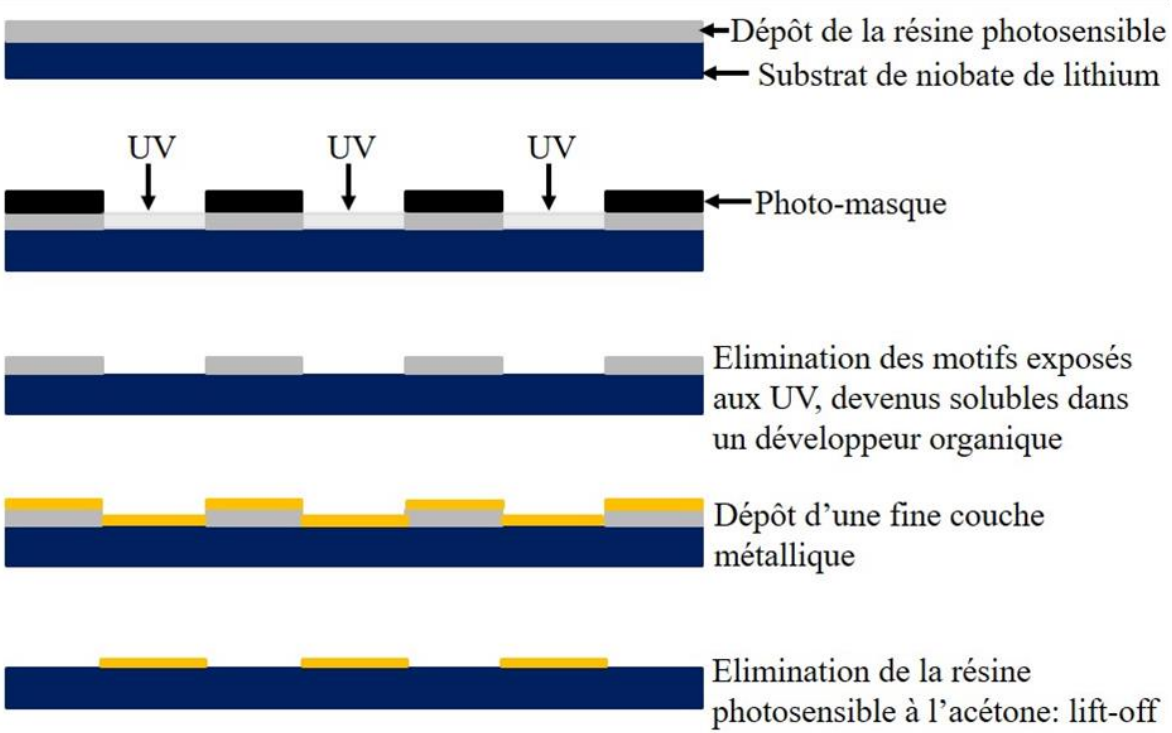
- (1) : N = 25, w = 2,5 mm
- (2) : N = 10, w = 2,5 mm
- (3) : N = 25, w = 1,25 mm
- Largeur électrode = 25 µm

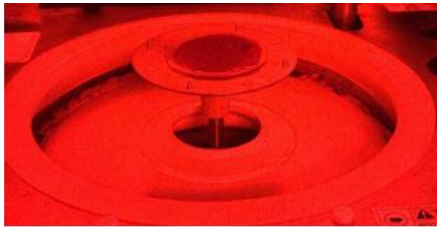


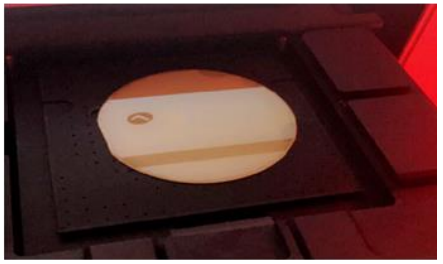
NB à 30MHz, largeur des électrodes = 33µm

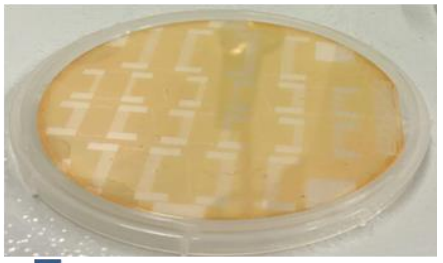
Réalisation des capteurs IDT

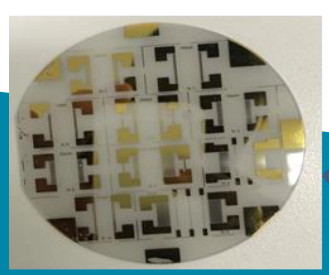
Lithographie optique (IEMN)

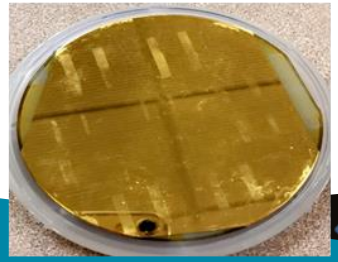


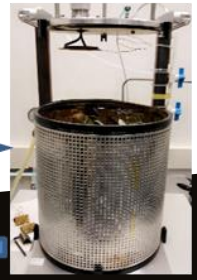








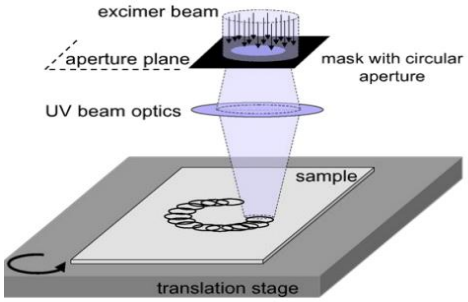


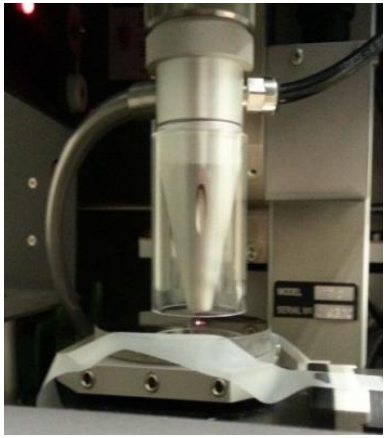


Réalisation des capteurs IDT

Ablation laser (CRIBC)

Electrodes obtenues par ablation par laser
(permet d'ablater sans dépolariser le matériau)

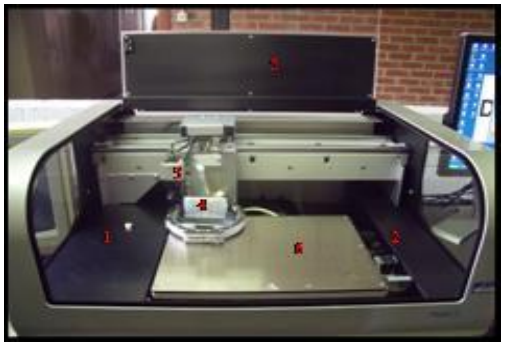


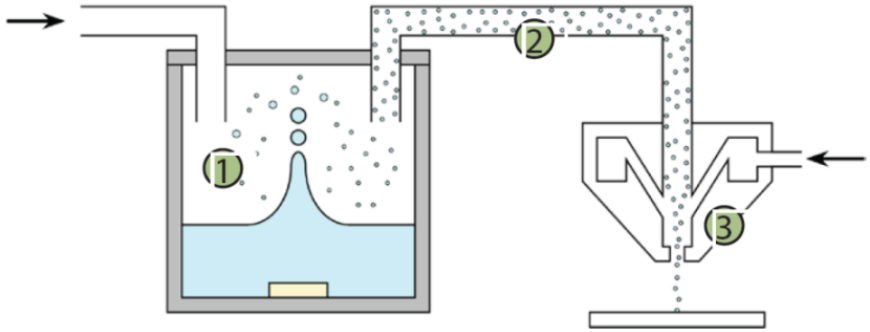


- Dépôt d'une couche mince métallique
- Soustraction de la matière à partir d'un laser (échauffement local)

Impression (SIRRIS)

Electrodes obtenues par impression d'encre
(encre constituée de nanoparticules)

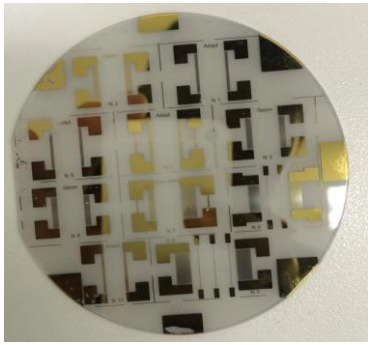


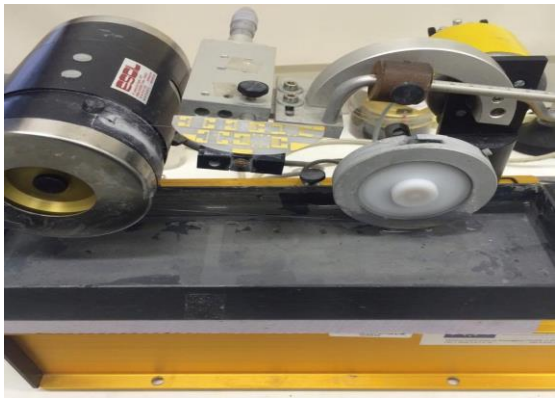


- Entrée du gaz inerte
- Dépression → Aspiration → Création de l'aérosol Sous forme de bouillard de gouttelettes
- Impression et dépôts
- Traitement thermique (~ 100°C)

Réalisation des capteurs IDT

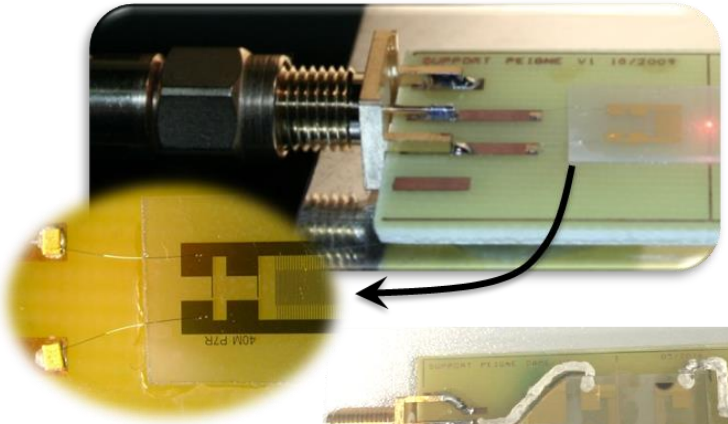
❖ **Découpage à la scie à fil des paires d'électrodes :**

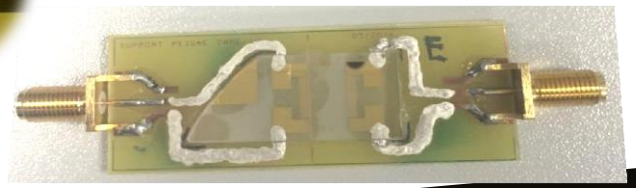




❖ **Assemblage des capteurs IDT :**

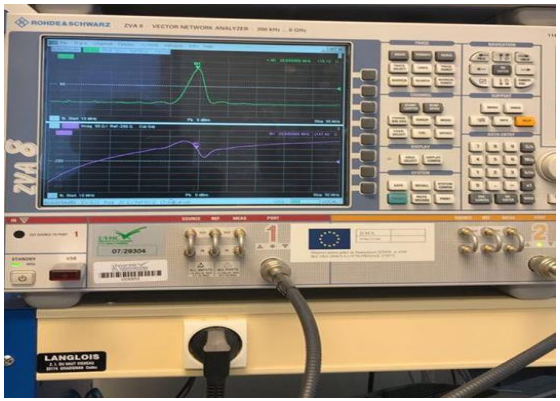
- Chaque IDT est collé sur un support époxy
- Un bord de carte SMA est fixé à l'arrière du support
- Les électrodes interdigitées sont reliées au bord de carte par fil d'or (wire bonding) ou de la laque d'argent

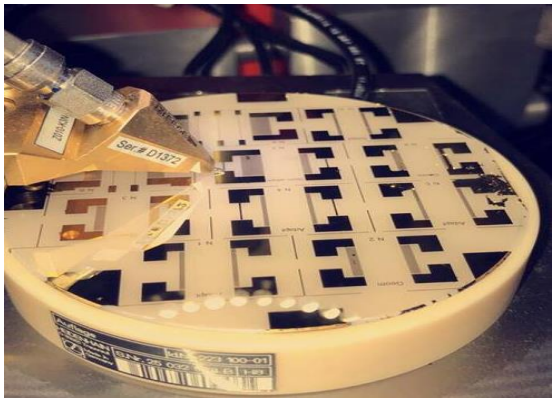


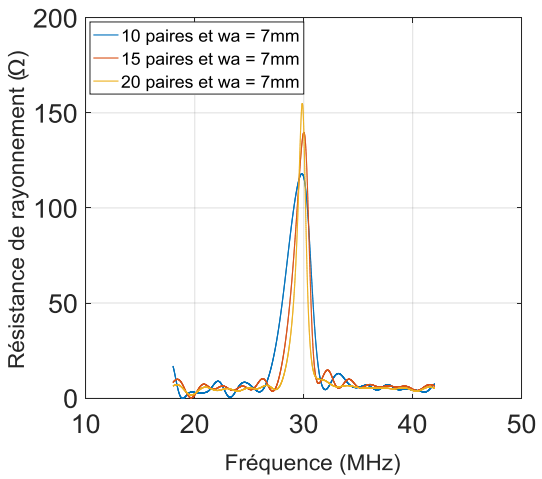


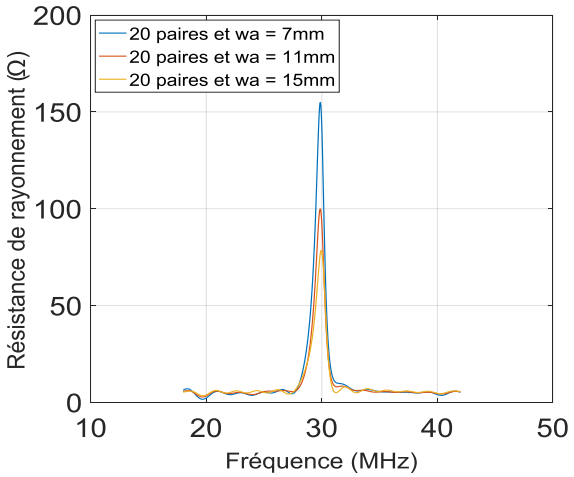
Caractérisation des capteurs IDT: Caractéristiques électriques

Exemple: évolution de l'impédance pour des capteurs fonctionnant aux alentours de 30MHz.



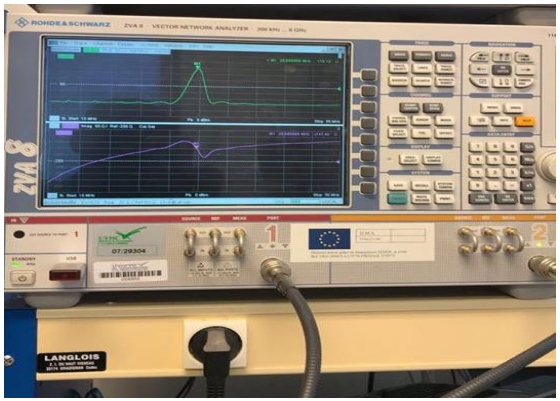


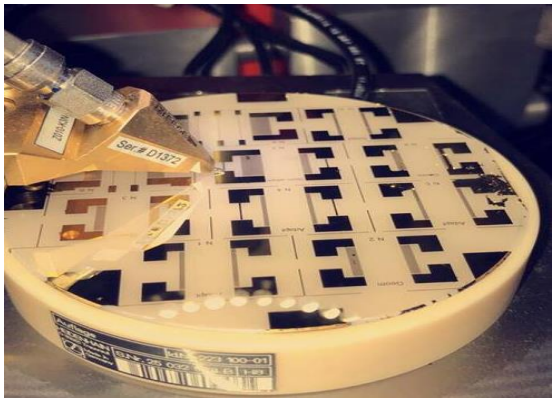




Caractérisation des capteurs IDT: Caractéristiques électriques

Exemple: évolution de l'impédance pour des capteurs fonctionnant aux alentours de 30MHz.

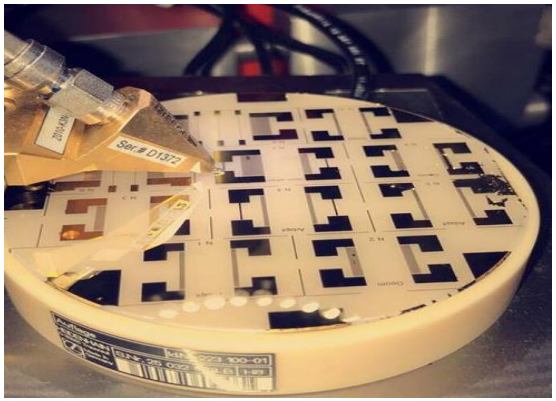


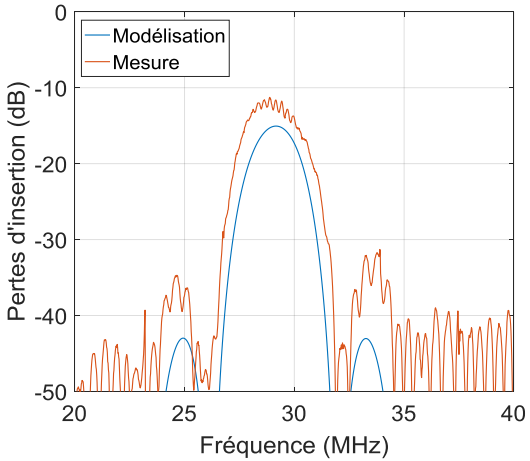


Fréquence (MHz)	Nombre de paires	Wa (mm)	Modélisation (Ω)	Mesure (Ω)	Ecart (%)
30	10	7	112	119	6
30	15	7	127	132	4
30	20	7	152	153	1
30	20	11	97	98	1
30	20	15	71	65	9

Caractérisation des capteurs IDT: caractéristiques électriques

Exemple: pertes d'insertion pour le capteur 10 paires et Wa de 7mm fonctionnant à 30 MHz.





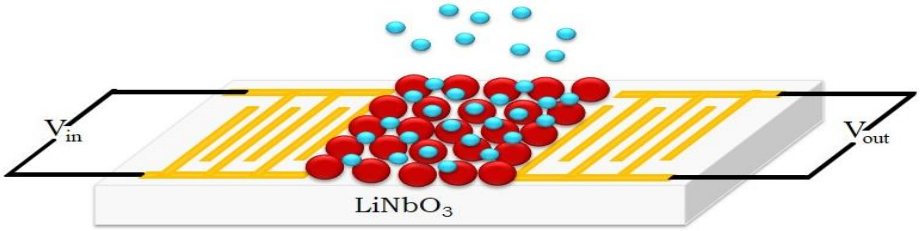
	Modélisation	Mesure	Ecart relatif (%)
Pertes (dB)	-15	-13	15

Réalisation capteurs IDT

Fonctionnalisation des Capteurs IDT-SAW

- Des couches sensibles à l'humidité sont placées entre l'IDT émetteur et l'IDT récepteur afin de fonctionnaliser le capteur vis-à-vis de l'humidité.

Capteur IDT de base



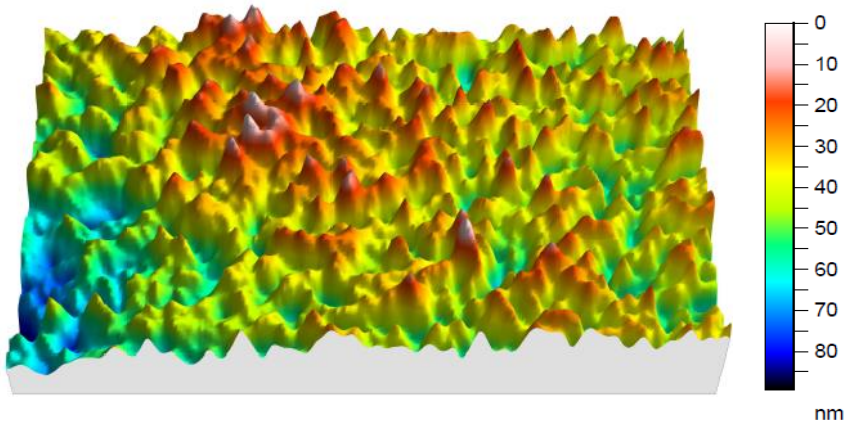
Capteur IDT avec couche sensible à l'humidité

Réalisation capteurs IDT

Fonctionnalisation des Capteurs IDT-SAW

- Des couches polymères PVA (alcool polyvinylique) ont été privilégiées pour les applications **basses températures (GC)**

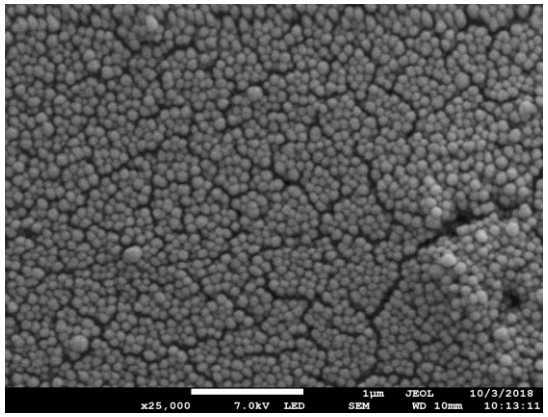
PVA		
P. massique	Epaisseur (µm)	RA (nm)
10%	25	3,8
5%	11	3,5
2,5%	6	2,8



Couche de PVA

- Des couches céramiques (silice) ont été privilégiées pour les applications **hautes températures (Réfractaires)**

Silice	
Nbre de couches	Epaisseur
1 dépôt	-
3 dépôts	-

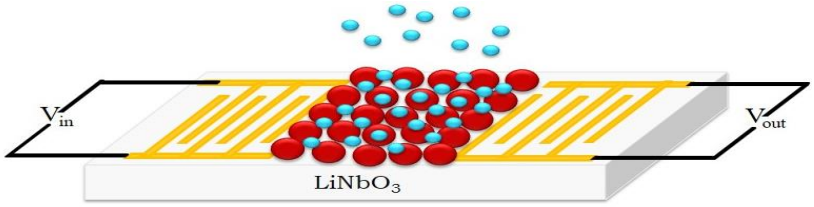


Couche de Silice

Système de détection de l'humidité

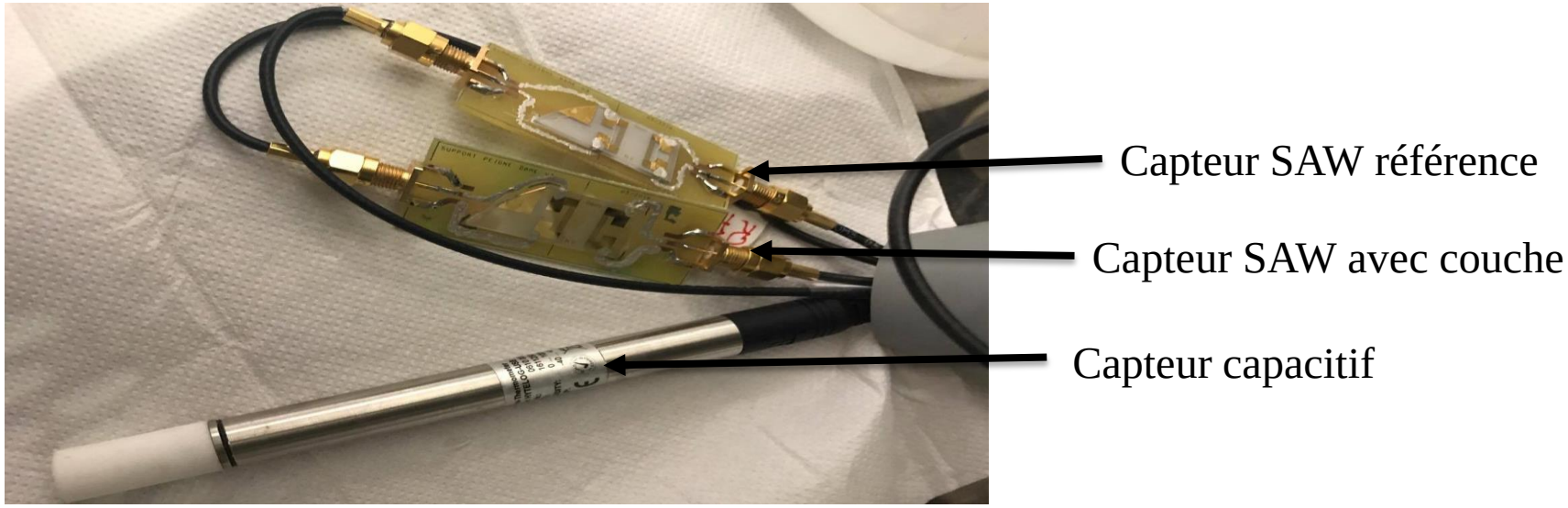
- Une mesure par différenciation basée sur deux capteurs à ondes acoustiques: un **capteur de référence** (sans couche sensible) et un **capteur d'humidité** sur lequel est déposée une couche sensible à l'humidité.

Référence



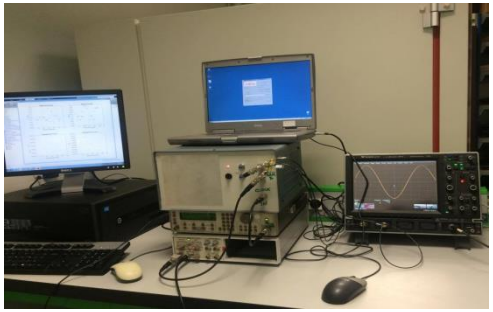
Capteur avec couche sensible à l'humidité

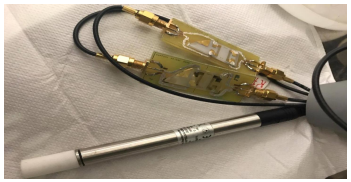
- Plus un capteur capacitif (commercial) dans la phase de développement des couches sensibles en basses températures

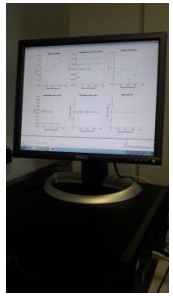


Système de détection de l'humidité

- **Caractérisation des capteurs IDT réalisée dans une chambre climatique Votch**



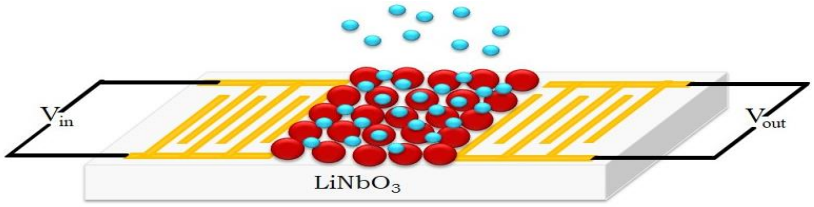




Système de détection de l'humidité

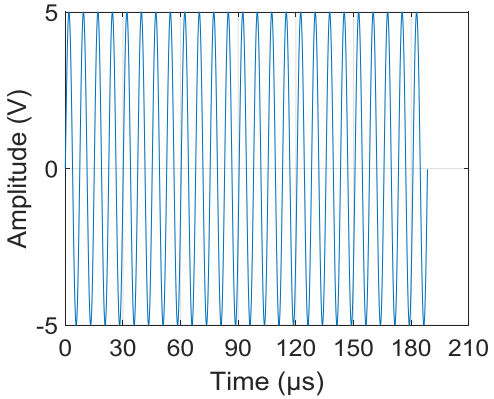
- Une mesure par différenciation basée sur deux capteurs à ondes acoustiques: un **capteur de référence** (sans couche sensible) et un **capteur d'humidité** sur lequel est déposée une couche sensible à l'humidité.

Référence

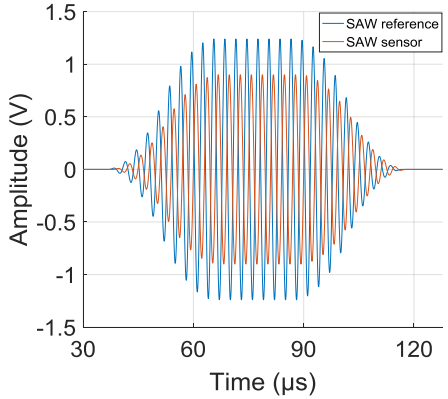


Capteur avec couche sensible à l'humidité

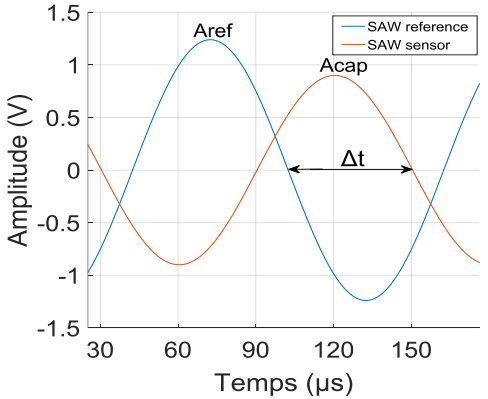
- La synchronisation des signaux issus des deux capteurs permet de suivre le retard sur le temps de vol et l'amplitude, en fonction de l'humidité relative.



Burst d'excitation



$$A = 20 * log\ (\frac{A_{cap}}{A_{réf}})$$

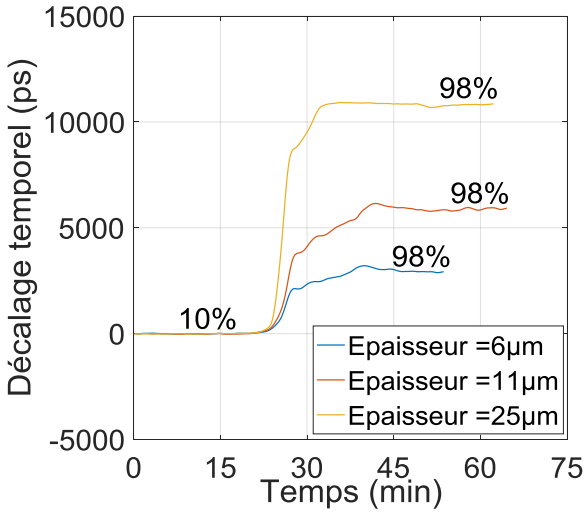


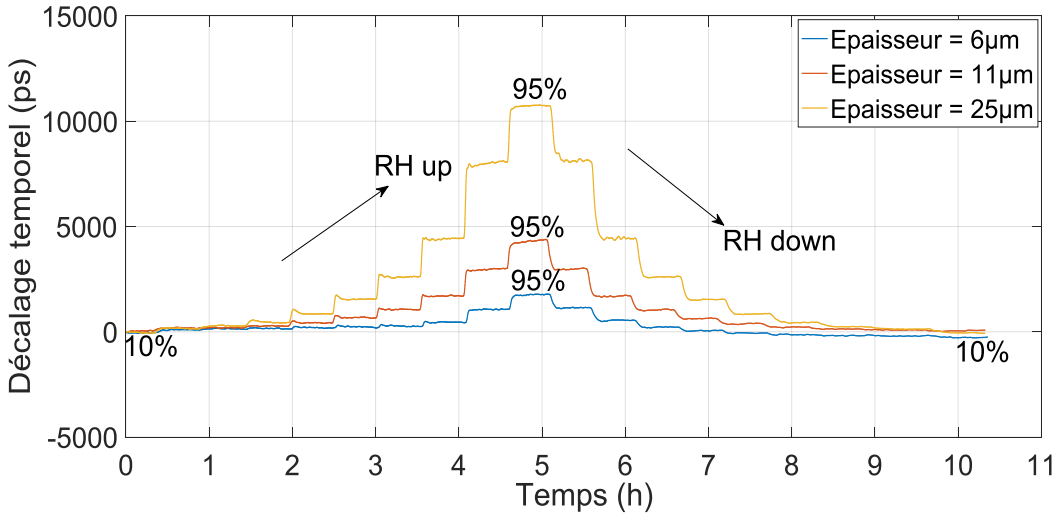
$$\varphi = 2 * \pi * F * \Delta t$$

Sensibilité des capteurs IDT vis-à-vis de l'humidité

- **Caractérisation des capteurs IDT avec la couche PVA (Capteurs température ambiante)**

Le dépôt dont l'épaisseur est de 25 µm est la plus sensible à l'humidité



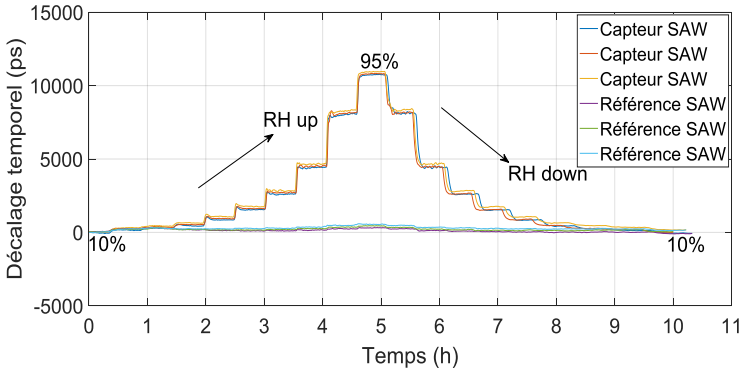


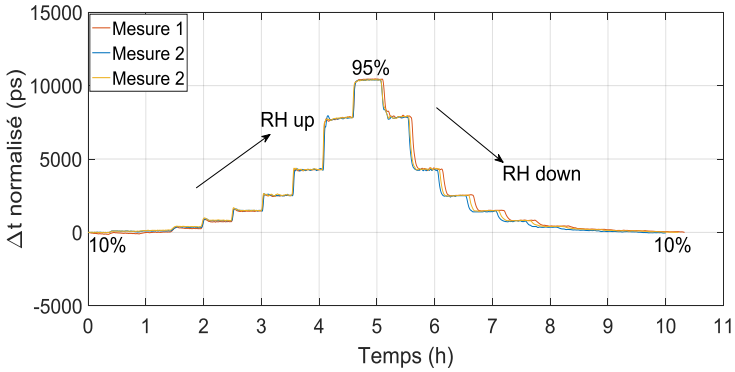
P. Massique	Epaisseur (µm)	Sensibilité (ps/1%RH)
10%	25	124
5%	11	65
2,5%	6	32

Sensibilité des capteurs IDT vis-à-vis de l'humidité

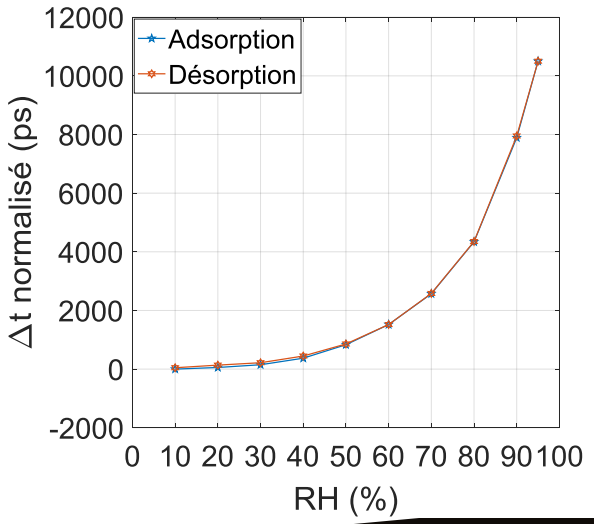
- **Caractérisation des capteurs IDT avec la couche PVA (Capteurs température ambiante)**

  La plage de sensibilité est de 10 à 98% d'humidité relative





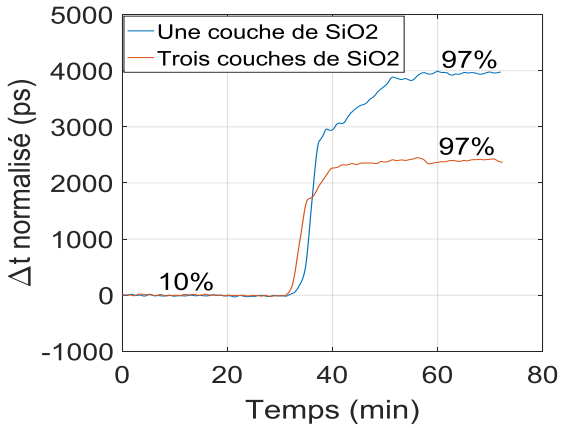
- Plage de sensibilité: 10% à 98% de RH à 30°C
- Sensibilité: 123ps/1%RH
- Hystérésis moyenne: 0,4%

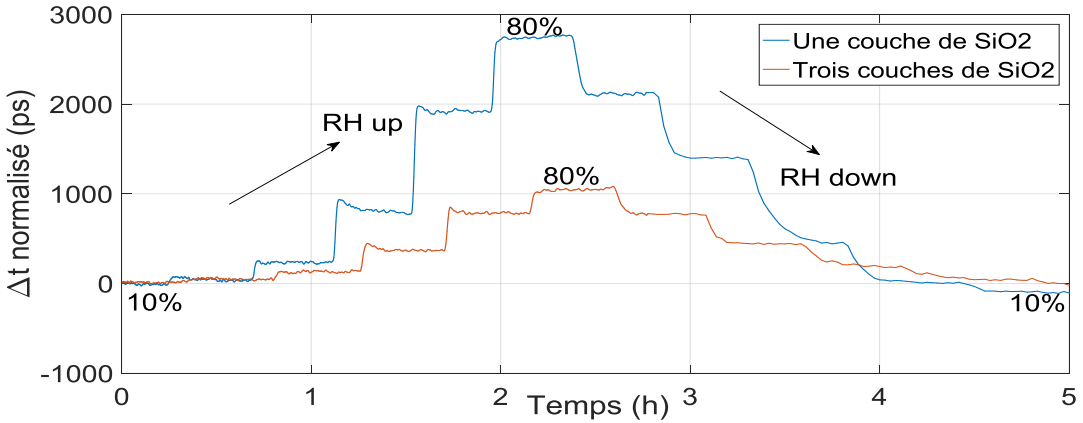


Sensibilité des capteurs IDT vis-à-vis de l'humidité

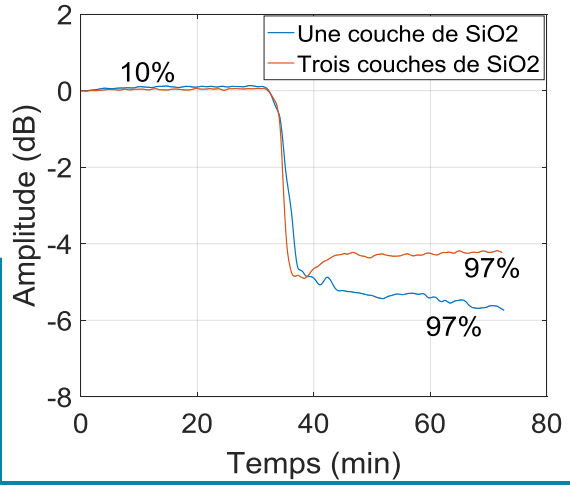
- **Caractérisation des capteurs IDT avec la couche Silice (Capteurs haute température)**

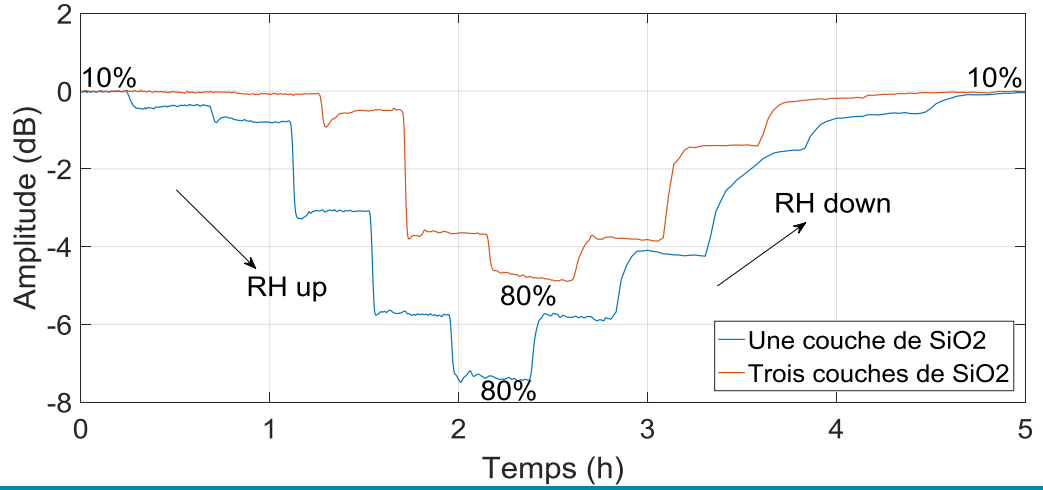
❖ La plage de sensibilité est de 10 à 97% d'humidité relative suivant le retard sur le temps de vol.





❖ La plage de sensibilité est de 10 à 97% d'humidité relative suivant l'amplitude.

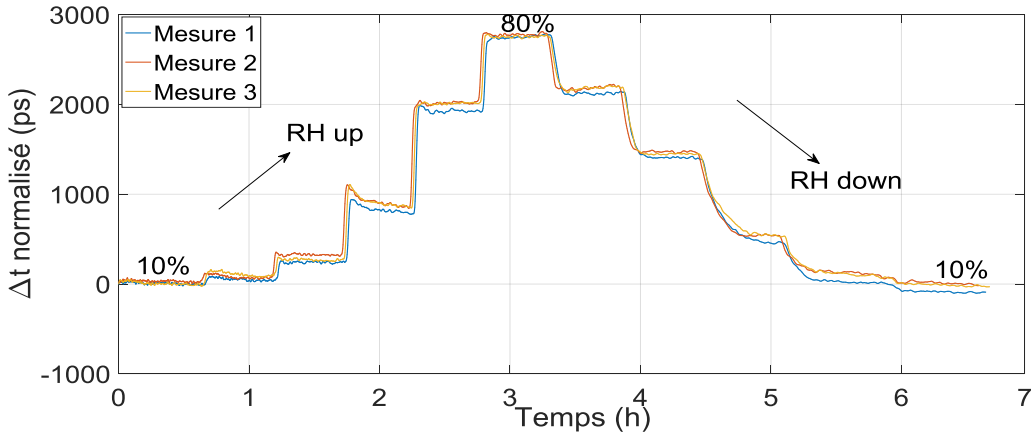


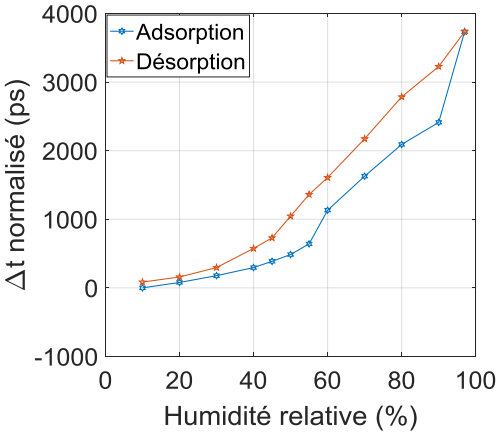


Sensibilité des capteurs IDT vis-à-vis de l'humidité

- **Caractérisation des capteurs IDT avec la couche Silice (Capteurs haute température)**

❖ Le suivi du retard sur le temps de vol est en fonction de l'humidité est plus précis que l'amplitude.



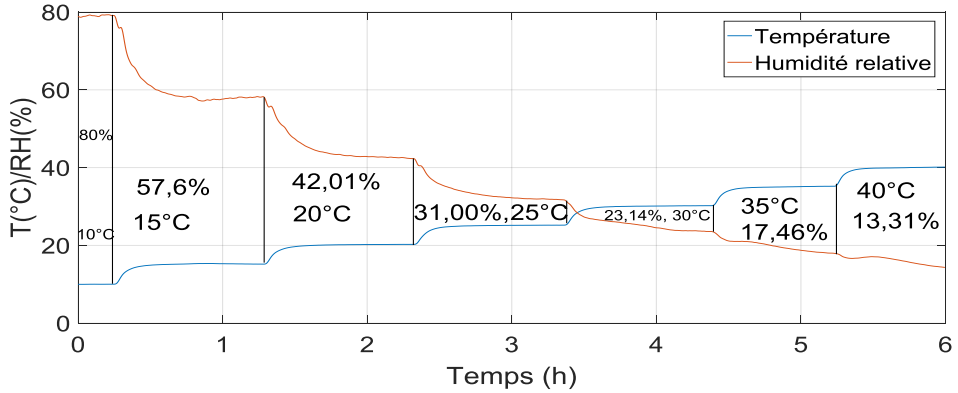


Paramètre de sortie du capteur	Sensibilité (ps ou dB/1%RH)	Hystérésis (%)	RSD (%)
Retard sur le temps de vol	43	12	0,72
Amplitude	0,06	10,2	11

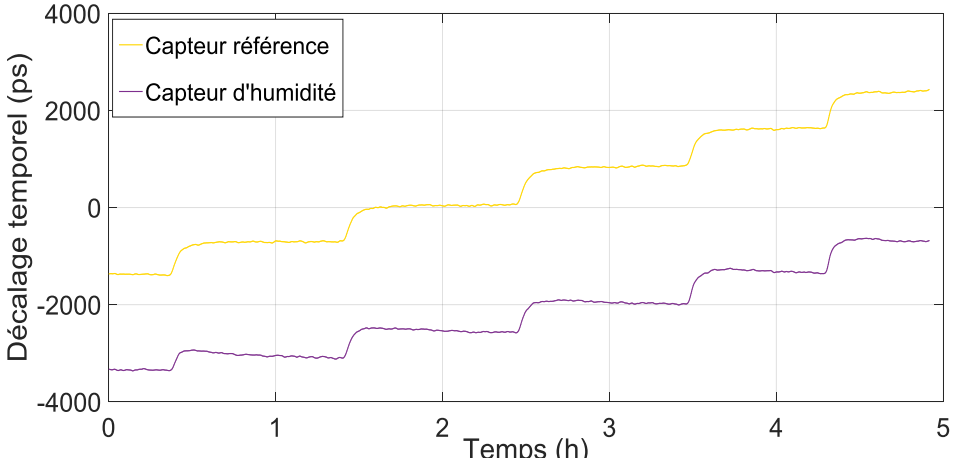
Sensibilité des capteurs IDT vis-à-vis de l'humidité

- **Caractérisation des capteurs IDT en tenant de la variation de température**

❖ Variation de la température entre 10 et 40°C tout en gardant la quantité d'eau absolue constante (capteur basse température).

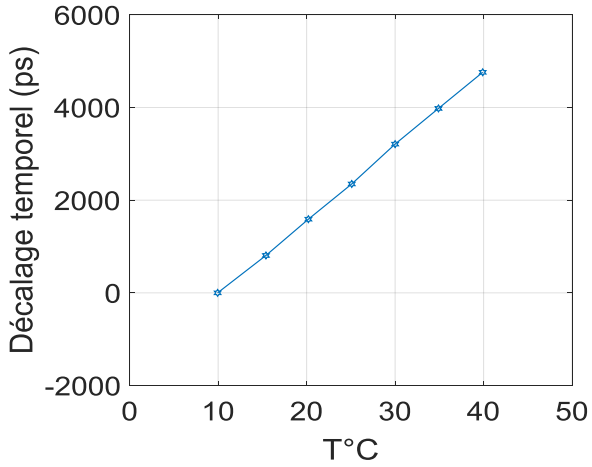


❖ Les deux capteurs SAW évoluent en fonction de la température



Evolution de la température au cours du temps (5°/h)

Le décalage temporel du capteur référence permet de remonter à la tp°

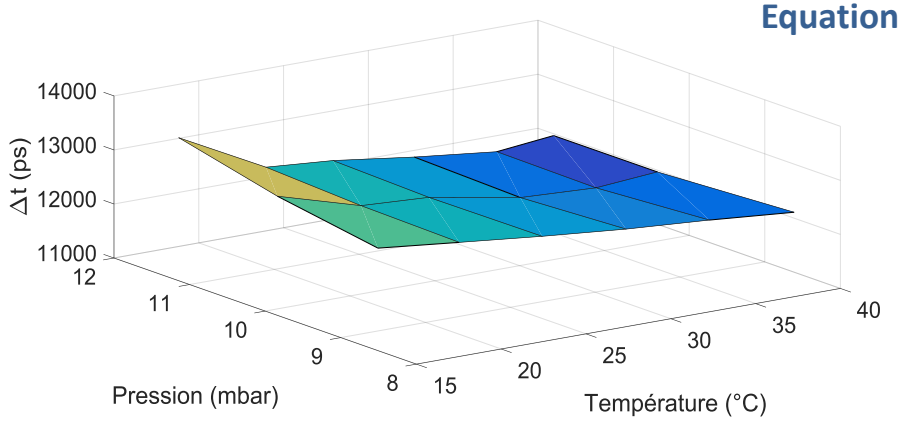


Sensibilité des capteurs IDT vis-à-vis de l'humidité

- **Caractérisation des capteurs IDT en tenant de la variation de température**

❖ Réalisation d'une nappe $\Delta t = f(T, p)$

Equation de la surface



❖ L'équation de cette surface est de forme:

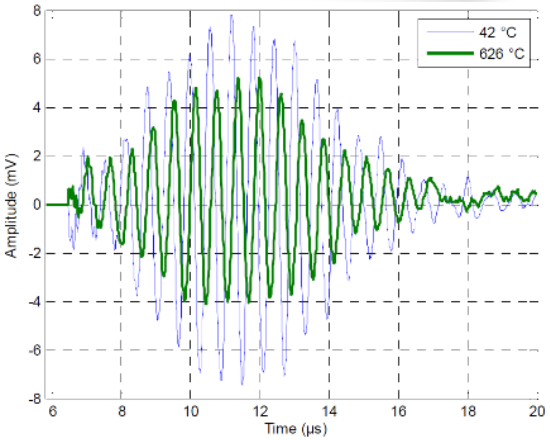
$$\Delta t(T, p) = k + aT + bp + cT^2 + dTp + ep^2$$

$$\Delta t(T, p) = 14674 - 13T - 350p + 2T^2 + 36Tp - 12p^2$$

Conclusion et perspectives

- Sensibilité démontrée
- Substrats piézoélectriques pour la haute température
- Essai en haute température
- Capteur sans fil

Vitrocéramique (UMons)



Essais chambre de pression

Capacité 600 mL

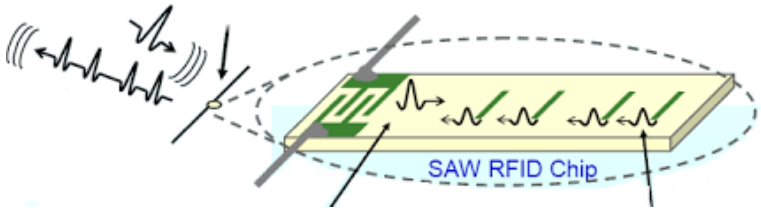
Diamètre intérieur 63.5 mm

Hauteur utile 203.2 mm

Pression de calcul 130 bar

Température de service max. 500 °C

Capteur sans fil



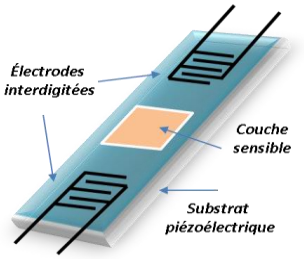
Développement de capteurs acoustiques à ondes de surface pour le monitoring des structures en béton

iemn
Institut d'Electronique, de Microélectroi
et de Nanotechnologie
UMR CNRS 8520

cnrs

Université Polytechnique HAUTS-DE-FRANCE

Interreg
France-Wallonie-Vlaanderen
UNION EUROPÉENNE
EUROPESE UNIE
CUBISM



- ✓ Pr Marc DUQUENNOY
- ✓ Thèse de Saliou NDAO
- ✓ M. Ouaftouh, N. Smagin

CARACTÉRISATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE DU BÉTON DE CHANVRE DANS LA BANDE WIFI

Mehdi Ferhat[1], Farès Bennai[2,3], Badreddine Ratni[4], Éric Vourc'h[1], Kamilia Abahri[2]
Franck Daout[1]

[1]SATIE, ENS Paris Saclay, Université Paris Saclay, Cachan, France
[2]LMT, ENS Paris Saclay, Université Paris Saclay, Cachan, France
[3]LaSIE, Université de La Rochelle, La Rochelle, France
[4]LEME, Université Paris Ouest, Sèvres, France,

C2I 2019
Bordeaux, le 30 janvier 2019

Plan

Béton de chanvre

- Matériaux à caractériser : béton de chanvre
- Constitution
- Utilisations
- Caractérisation hydrique / conditionnement

Mesures électromagnétiques

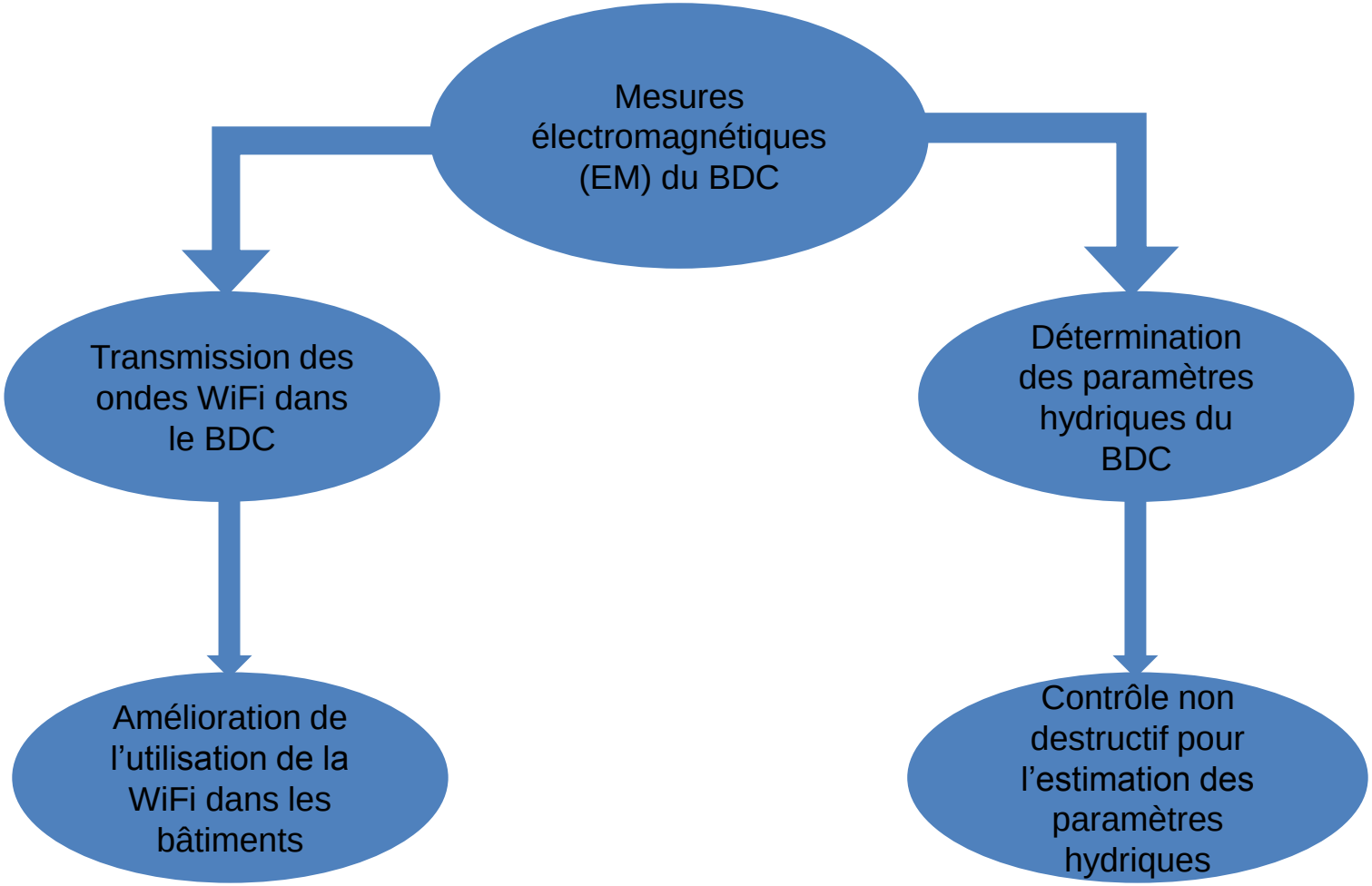
- Approche expérimentale : spectroscopie diélectrique
- Paramètres S de l'échantillon de béton de chanvre

Inversion des paramètres S

- Résultats

Conclusion et perspectives

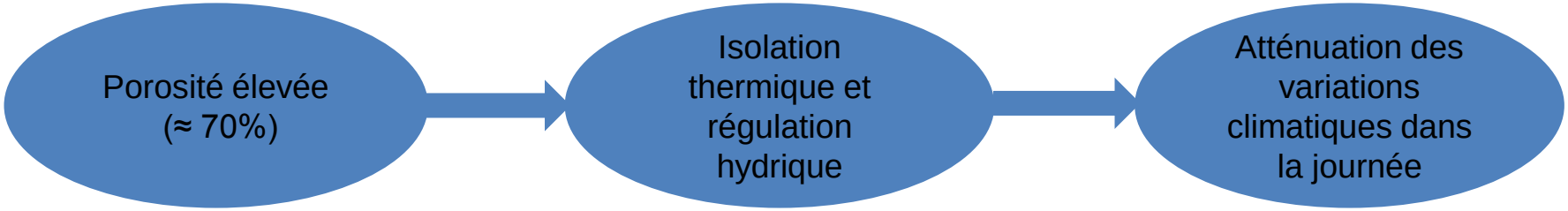
Pourquoi caractériser le béton de chanvre (BDC)



Matériau à caractériser : le béton de chanvre (BDC)

Béton de chanvre

Mur en béton de chanvre



Réduction de la consommation d'énergie: Bilan carbone négatif

Fabrication du BDC

Chanvre

Défibrage de la tige

Chenevotte

Calcaire

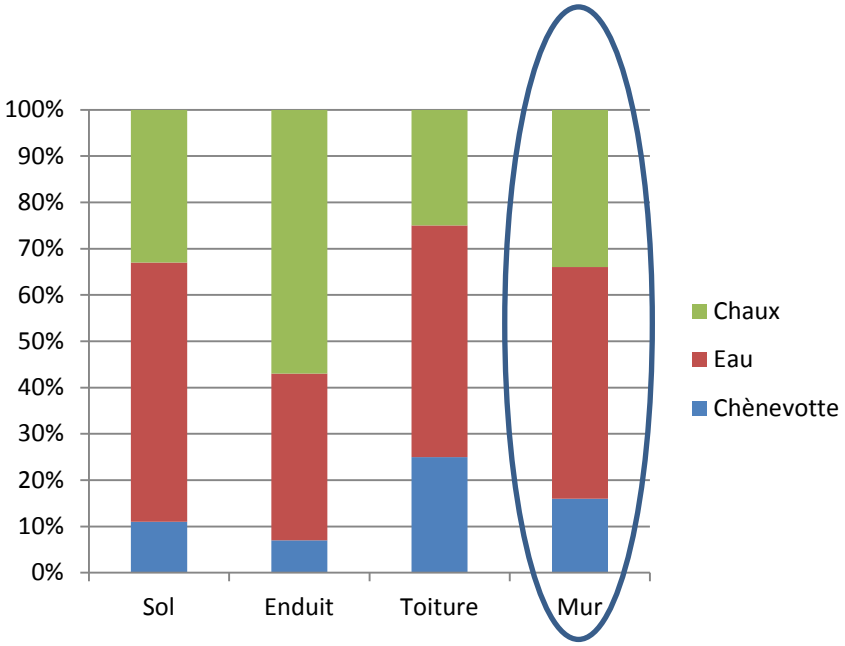
Cuisson

Chaux

Eau

Utilisations du BDC

- 4 utilisations possibles pour le béton de chanvre
- A chaque utilisation du BDC correspond une formulation



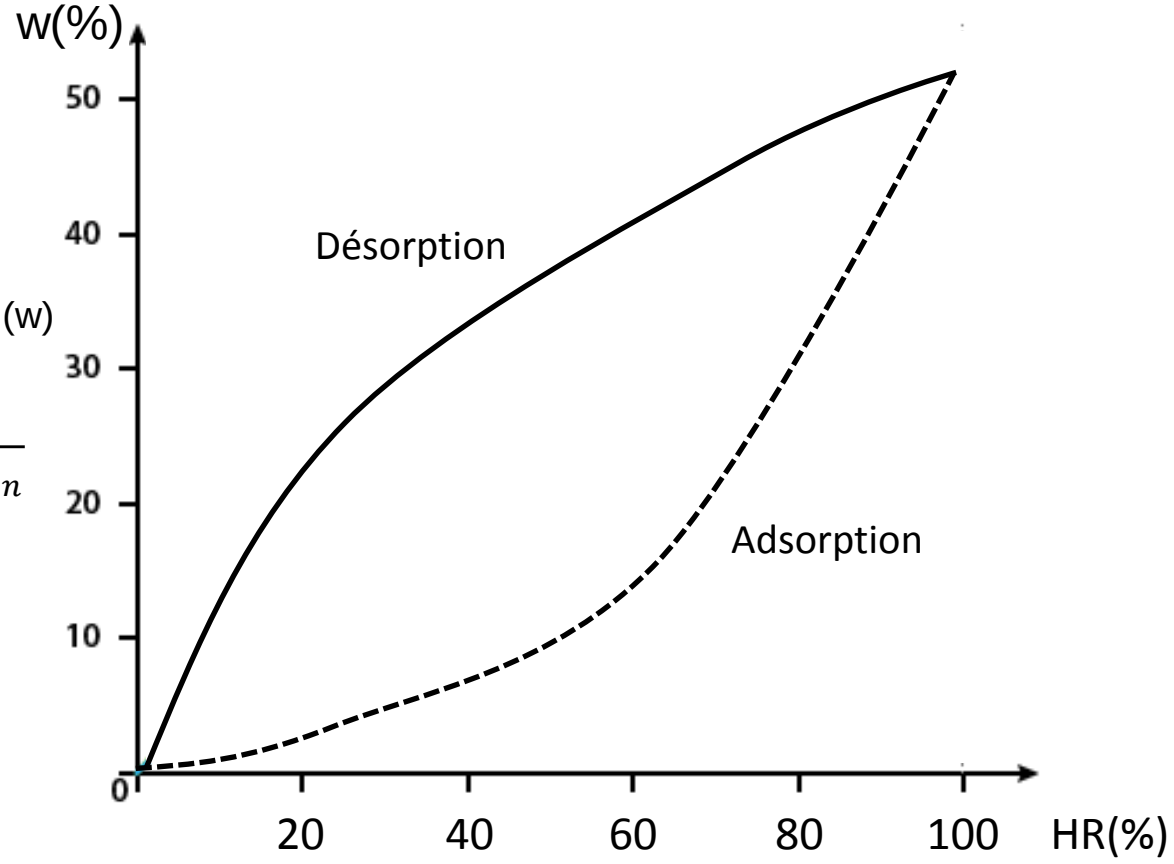
Formulation utilisée

Chènevotte (kg)	10
Chaux (kg)	25
Eau (kg)	35
Eau/Chaux (-)	1.4
Chaux/Chènevotte (-)	2.5

Caractérisation hydrique

Le BDC est exposé à une humidité relative (HR) variable

Isotherme d'adsorption – désorption [1]



Teneur en eau (w)

$$w = \frac{m_{eau}}{m_{échantillon}}$$

Approche expérimentale : spectroscopie diélectrique

Permittivité diélectrique : Propriété physique quantifiant la capacité d'un matériau à se polariser sous l'effet d'un champ électrique externe.

Milieu	Re(ε_r)
Eau	≈ 80
Particules solides	$2 < \varepsilon_r < 15$
Air	1

Spectroscopie diélectrique : Estimation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence du champ EM.

Intérêt de la spectroscopie diélectrique : Présence de milieux dont la permittivité varie avec la fréquence (par exemple l'eau).

Approche expérimentale pour la caractérisation EM du BDC

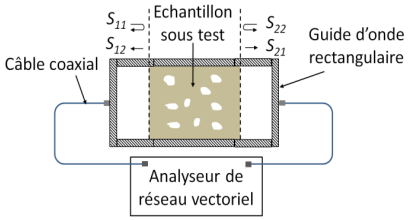
Matériau biosourcé

Paramètres

ε (w(HR))

Banc de mesure

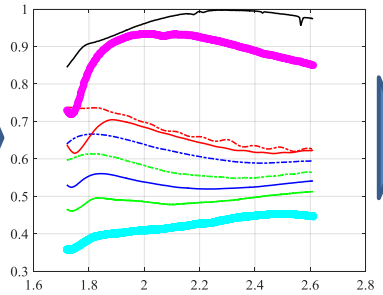
Guide d'onde rectangulaire



- Dispersif
- Hétérogène

Signaux mesurés

$|S_{ij}|$



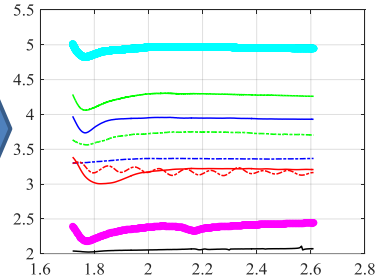
Fréquence (GHz)

Traitement du signal (inversion)

Méthode NRW

Signal inversé

$Re(\varepsilon_r)$

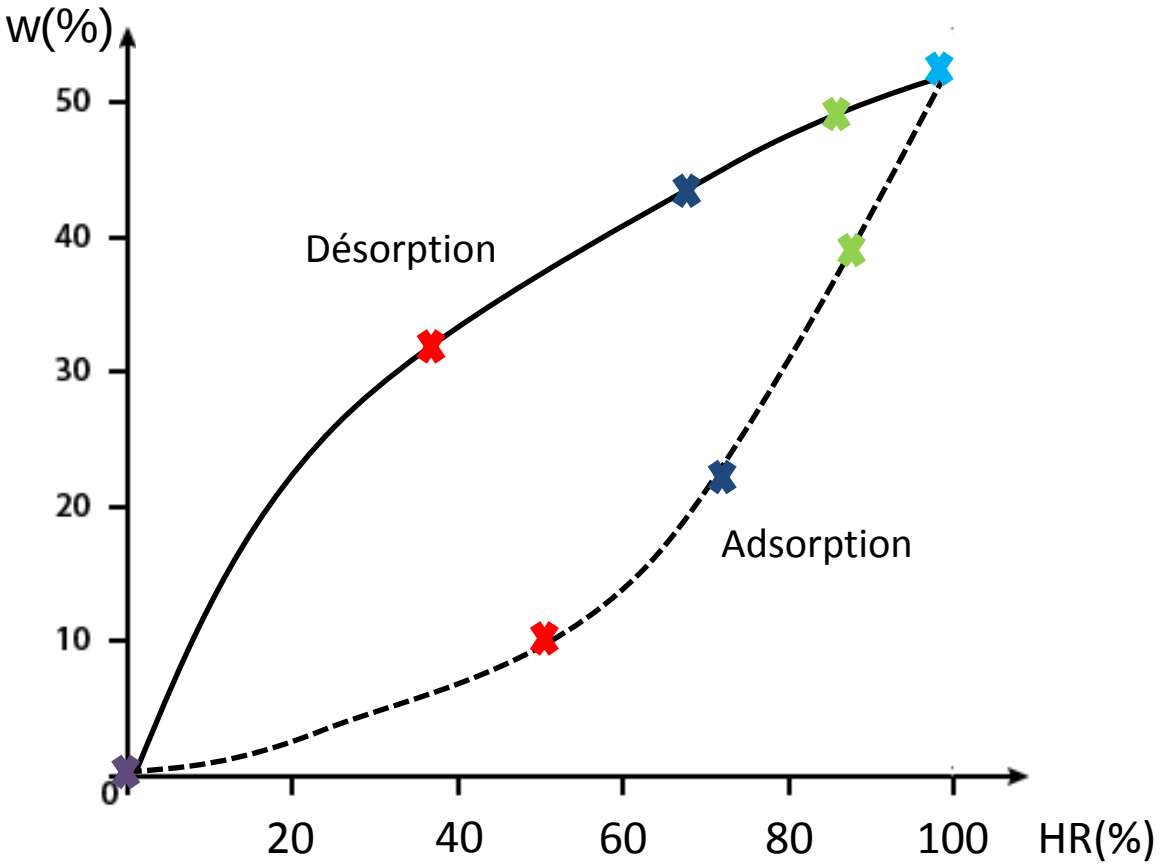


Fréquence (GHz)

Conditionnement de l'échantillon du BDC

Le BDC est exposé à différentes HR

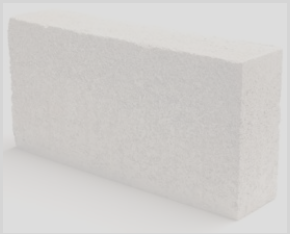
Isotherme d'adsorption – désorption



- HR fixée grâce à une solution saline (par ex. NaCl or K2SO4)

Approche expérimentale pour la caractérisation EM du BDC

Matériau biosourcé

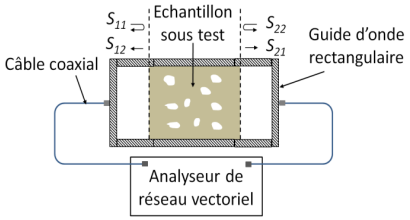


Paramètres

ε (w(HR))

Banc de mesure

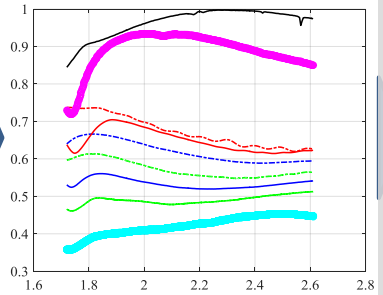
Guide d'onde rectangulaire



- Dispersif
- Hétérogène

Signaux mesurés

$|S_{ij}|$



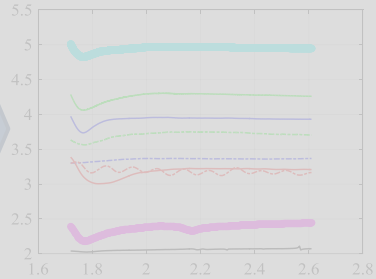
Fréquence (GHz)

Traitement du signal (inversion)

Méthode NRW

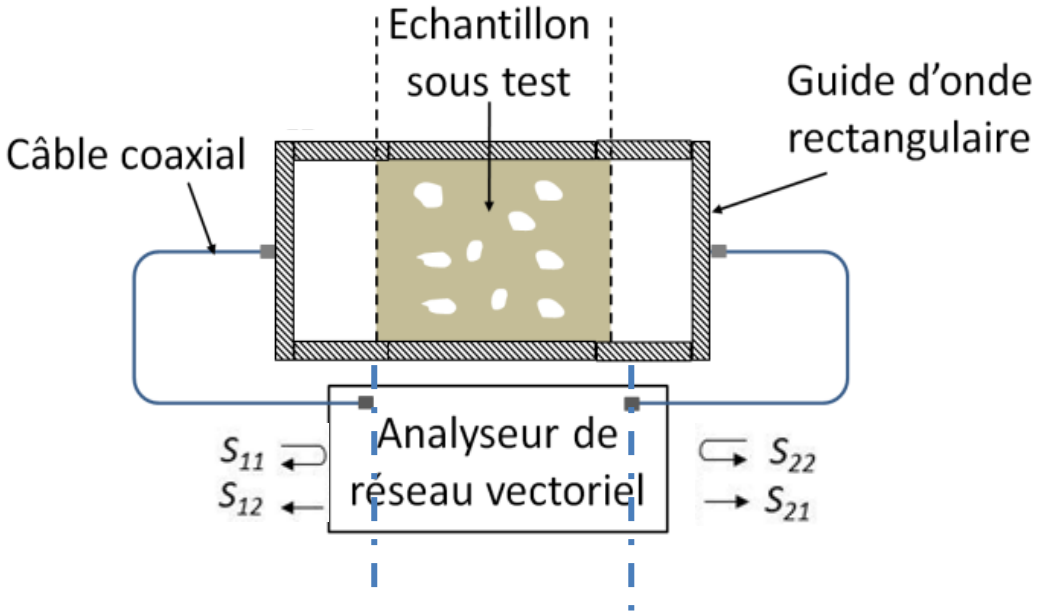
Signal inversé

$Re(\varepsilon_r)$

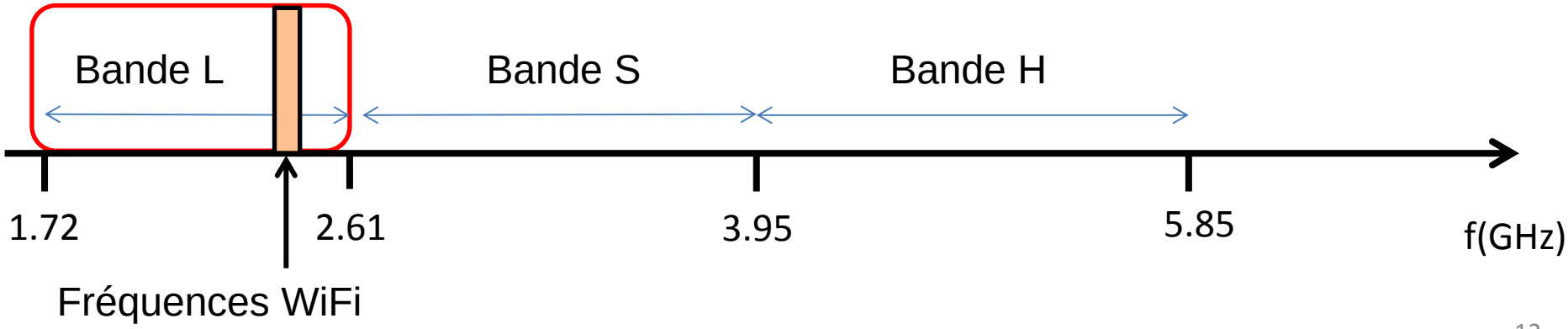


Fréquence (GHz)

Mesures EM : paramètres S



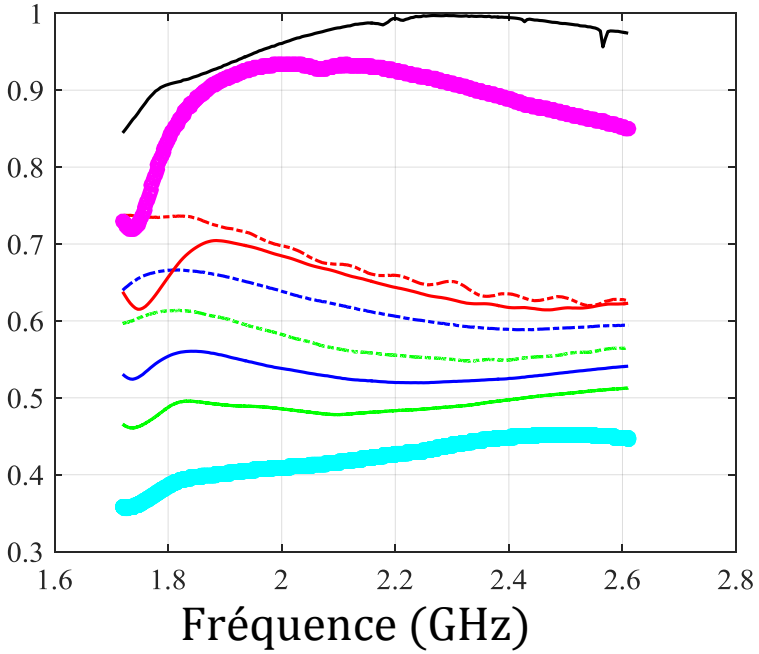
Actuellement

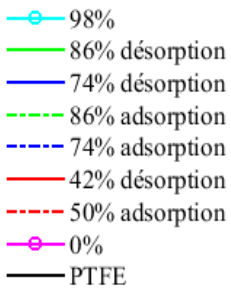


Mesures EM : paramètres-S

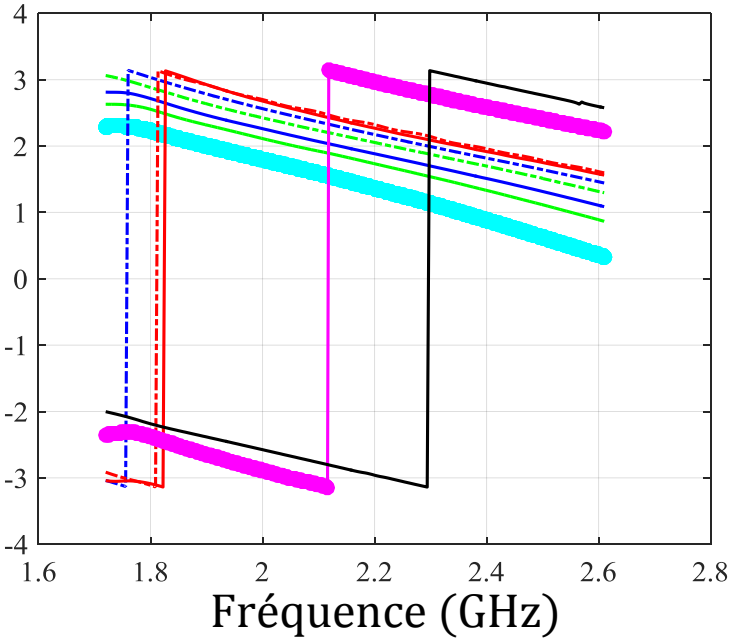
Coefficient de transmission (S_{21}) mesuré sur l'échantillon de BDC

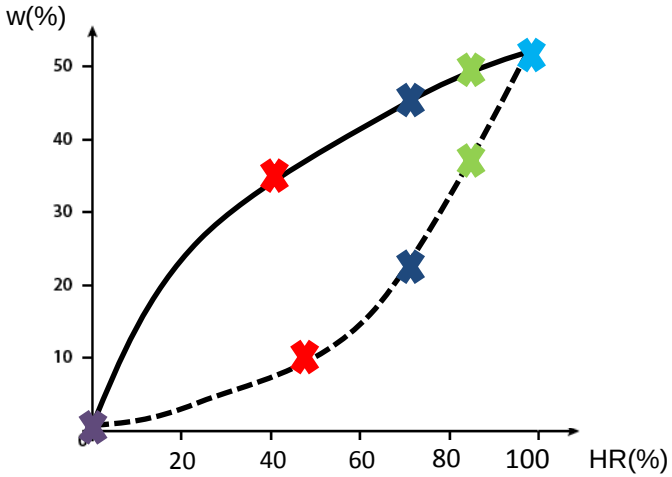
$|S_{21}|$





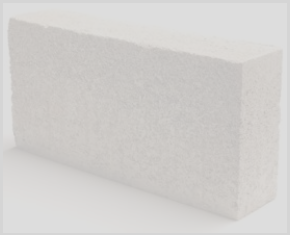
$\varphi(S_{21})$





Approche expérimentale pour la caractérisation EM du BDC

Matériau biosourcé

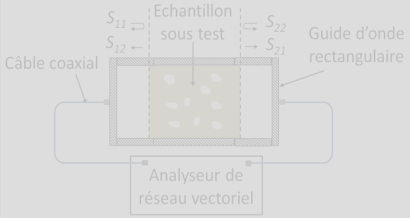


Paramètres

ε (w(HR))

Banc de mesure

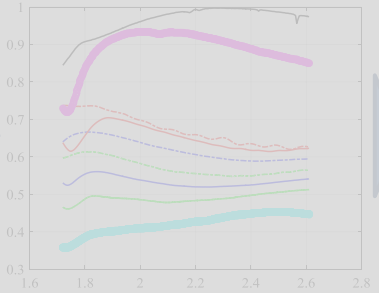
Guide d'onde rectangulaire



- Dispersif
- Hétérogène

Signaux mesurés

$|S_{ij}|$



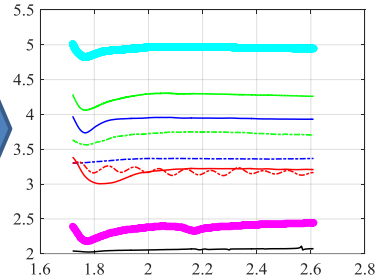
Fréquence (GHz)

Traitement du signal (inversion)

Méthode NRW

Signal inversé

$Re(\varepsilon_r)$

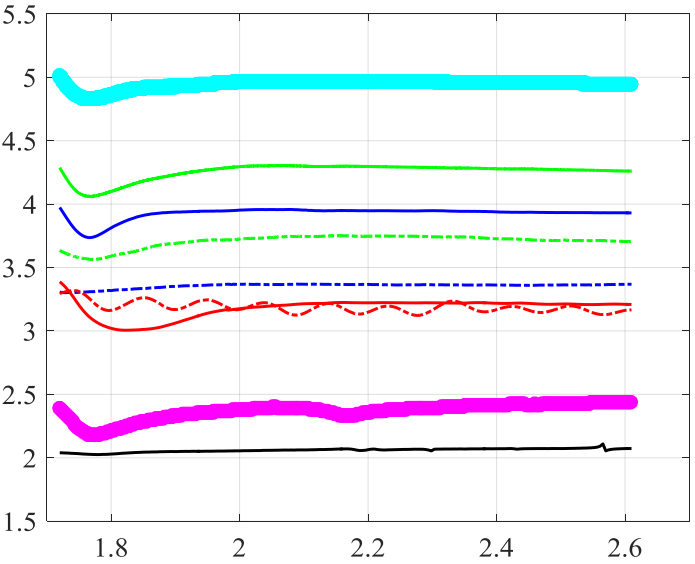


Fréquence (GHz)

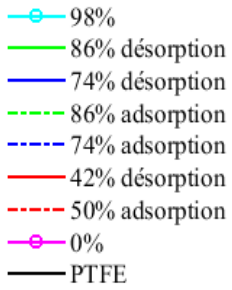
Inversion des paramètres S : Résultats

ε_r^* obtenue à différentes *HR* à partir de l'inversion des paramètres (méthode NRW)

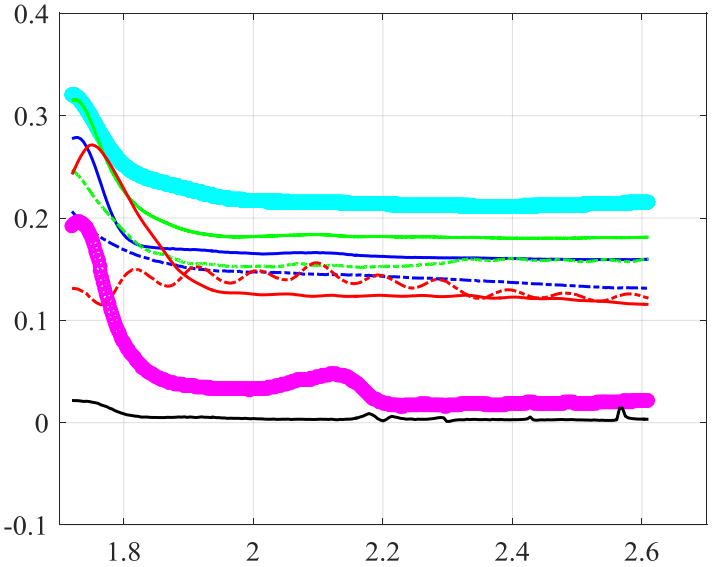
Re (ε_r^*)



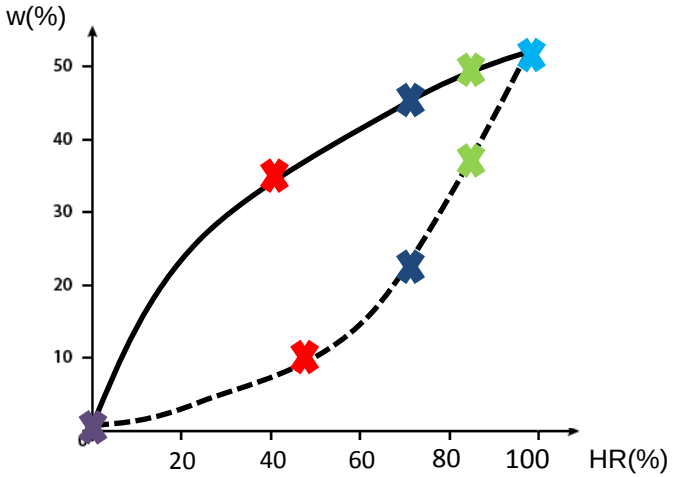
Fréquence (GHz)



tanδ

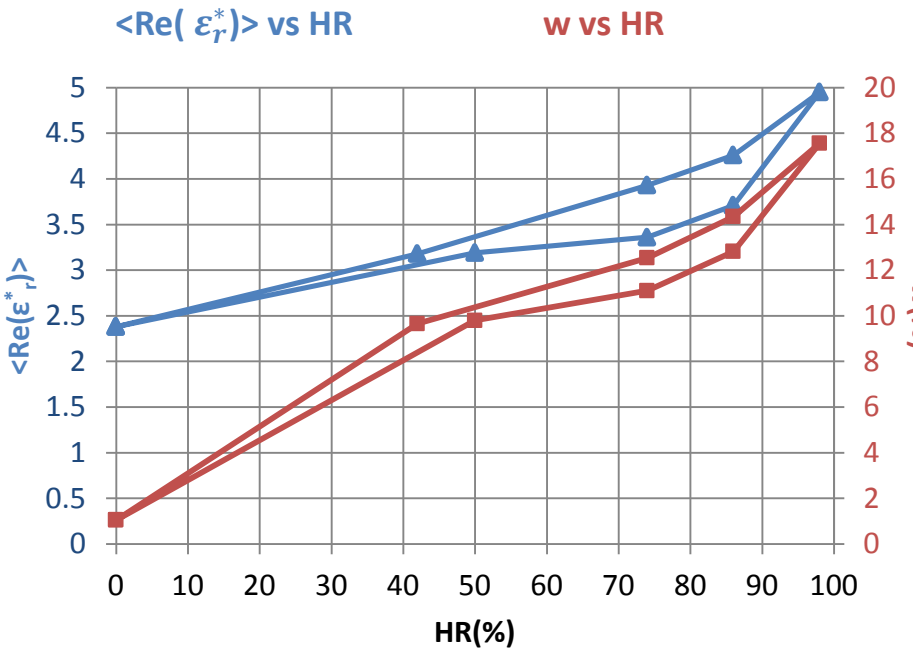


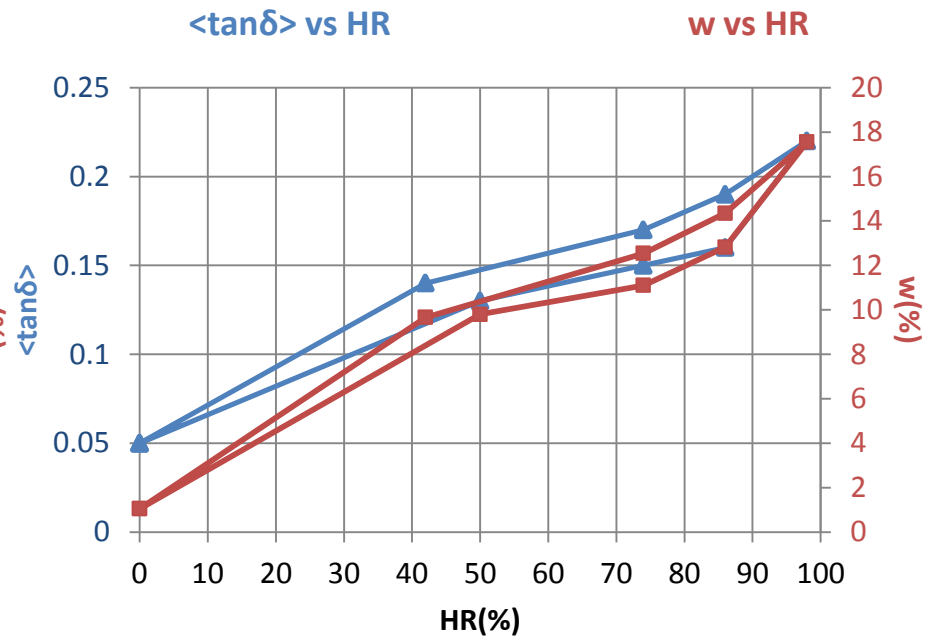
Fréquence (GHz)



Les mesures EM sont sensibles à la variation de *w(HR)*

Inversion des paramètres S : Résultats





- Adsorption : ε_r^* augmente avec HR et donc avec *w*.
- Désorption : ε_r^* diminue avec HR et donc avec *w*.
- Pour une HR donnée, $\varepsilon^*_{r,adsorption} \neq \varepsilon^*_{r,désorption}$

$$w = \frac{m_{HR} - m_{sec}}{m_{sec}}$$

Mise en évidence d'un cycle d'hystérésis en permittivité correspondant au comportement hystérétique de l'isotherme d'adsorption-désorption

Conclusion

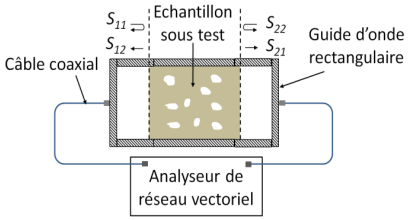
Matériau biosourcé

Paramètres

ε (w(HR))

Banc de mesure

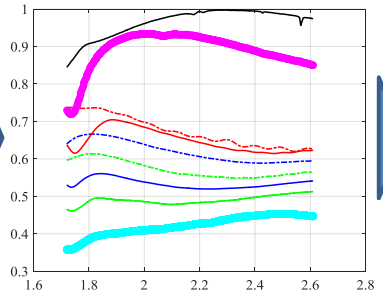
Guide d'onde rectangulaire



- Dispersif
- Hétérogène

Signaux mesurés

$|S_{ij}|$



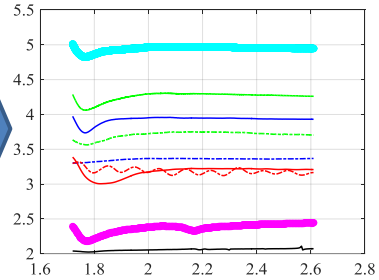
Fréquence (GHz)

Traitement du signal (inversion)

Méthode NRW

Signal inversé

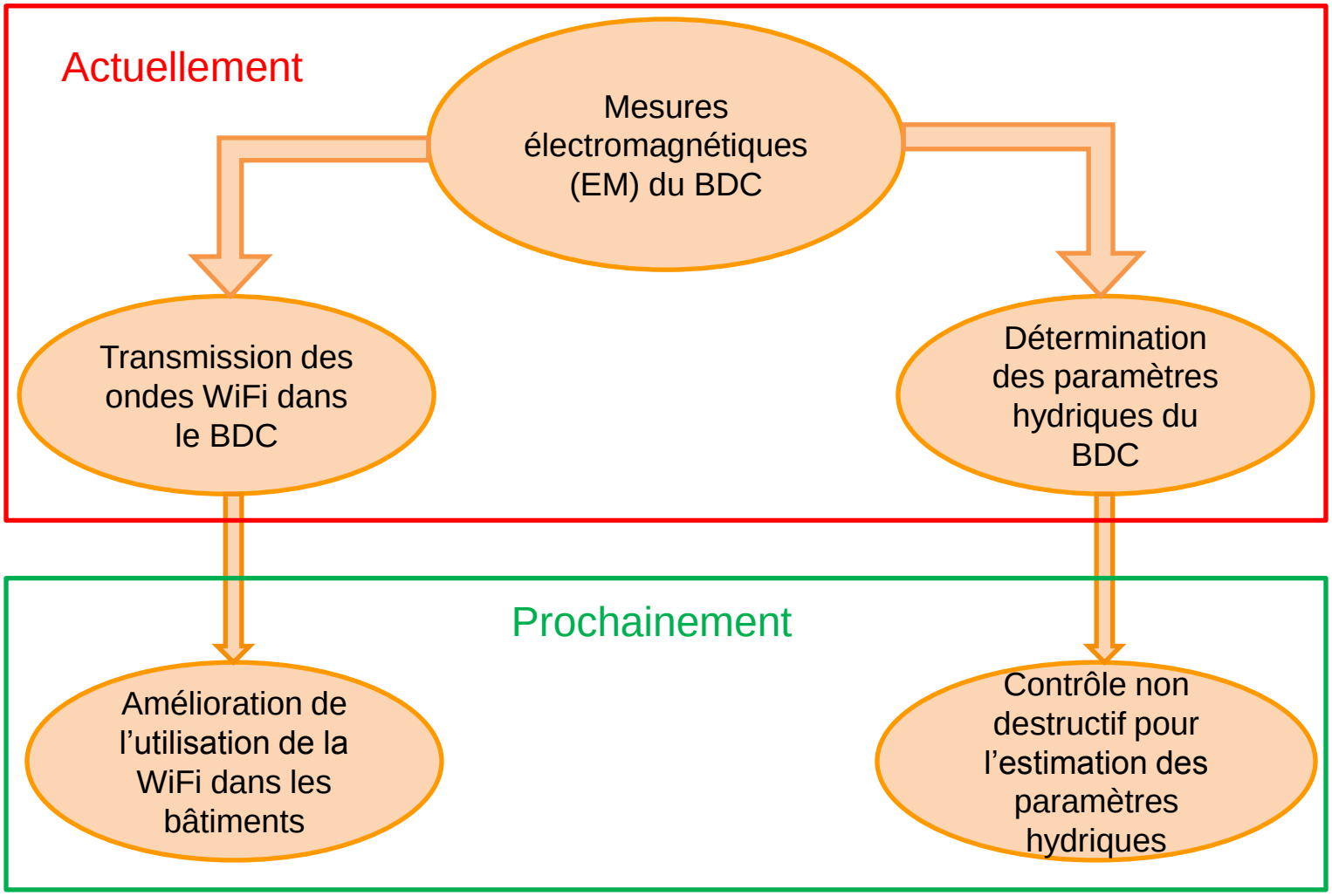
$Re(\varepsilon_r)$



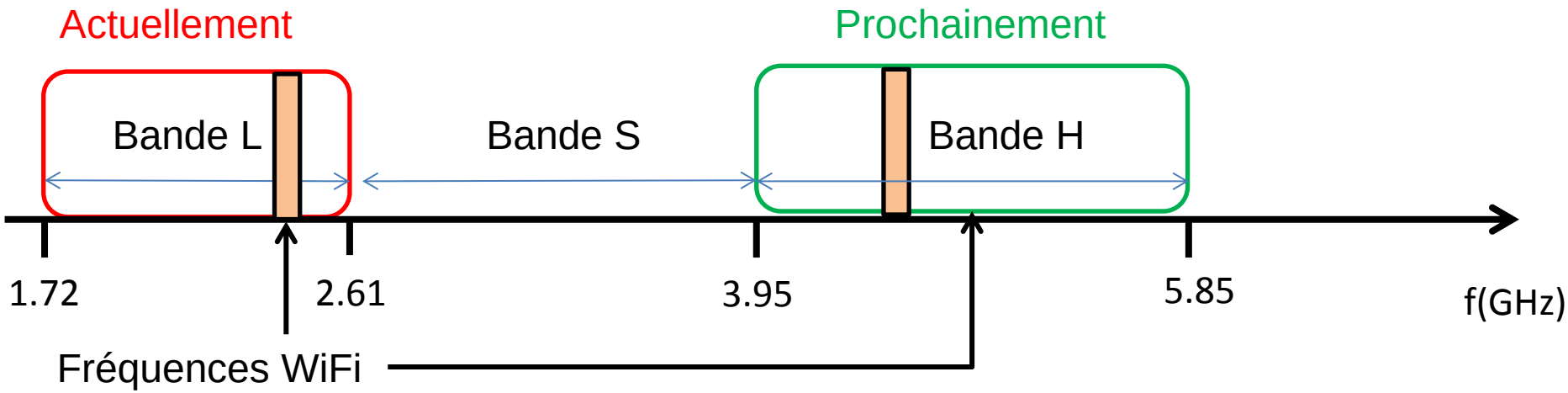
Fréquence (GHz)

- Variation intéressante de $\boldsymbol{\varepsilon_r^*}$ en fonction de *w(HR).*
- Obtention du cycle d'hystérésis d'adsorption-désorption avec une méthode électromagnétique.

Perspectives



Perspectives



SUIVI ÉLECTROMAGNÉTIQUE RF DE L'HYDRATATION ET DU SÉCHAGE D'UN MORTIER

Mehdi Ferhat[1], Abdellatif el Fellahi[2], Thierry Bore[3], Aveline Darquennes[4], Farid Benboudjema[5], Franck Daout[1], Françoise Schmitt[1], Eric Vourc'h[1]

[1]SATIE, ENS Paris Saclay, Université Paris Saclay, Cachan, France
[2]IEMN, UMR CNRS 8520, Villeneuve d'Ascq, France
[3]School of Civil Engineering, University of Queensland, St Lucia, Australia
[4]INSA Rennes, département de génie civil et urbain (GCU), Rennes, France
[5]LMT, ENS Paris Saclay, Université Paris Saclay, Cachan, France

Plan

Problématique générale (caractérisation hydrique de matériaux de construction)

L'hydratation d'un mortier

Mesures en spectroscopie RF

Modélisation (lois de mélange)

Conclusion et perspectives

Problématique générale

Quoi ? Mesurer de paramètres électromagnétiques de matériaux pour le bâtiment

Pourquoi ? Déduire certains grandeurs physiques

Intérêt ? Mesures in-situ ou en laboratoire

Objectif

Développer un système de suivi du degré d'hydratation d'un mortier

Approche scientifique

Suivi électromagnétique RF de l'hydratation d'un mortier

L'hydratation d'un mortier

Matériau de construction (enduit, joint…)

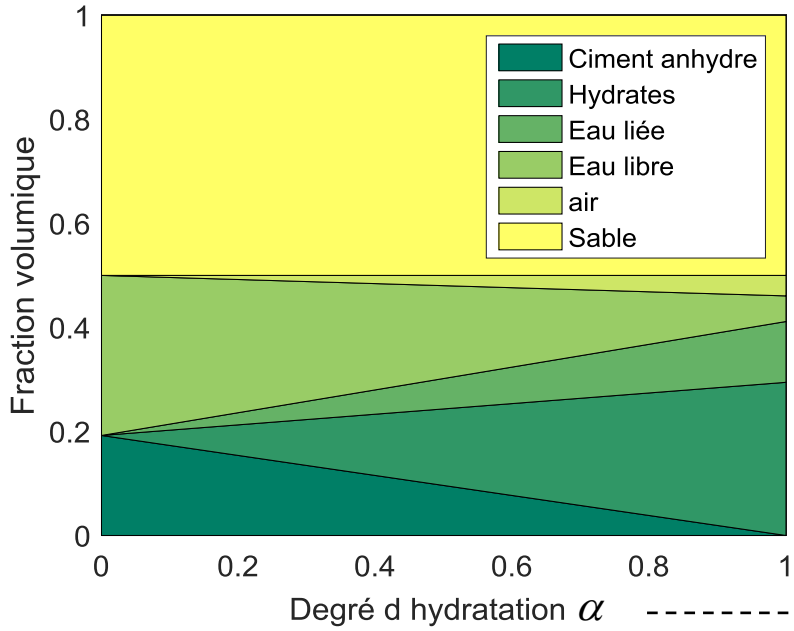
- Eau.
- Sable (agrégats).
- Ciment (liant).

Réaction d'hydratation

- Eau libre.
- Eau liée
- Sable (agrégats).
- Ciment (liant).
- Hydrates.
- Air

+

Dégagement de chaleur
(Méthode calorimétrique)



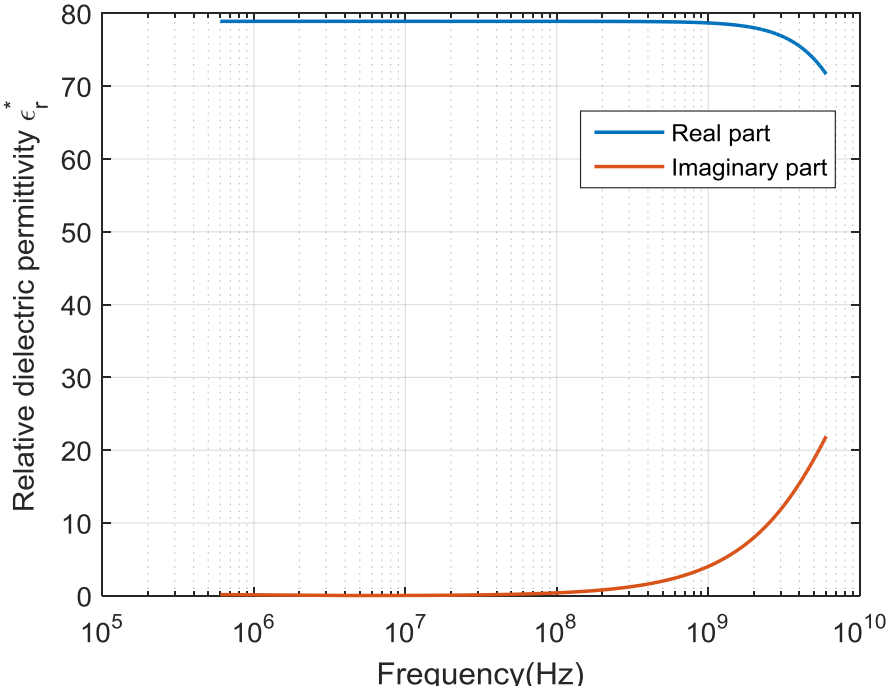
$$\alpha = \frac{Quantité\ de\ ciment\ ayant\ réagit}{Quantité\ de\ ciment\ initiale}$$

Mesures de spectrosopie RF

Permittivité diélectrique : Propriété physique quantifiant la capacité d'un matériau à se polariser sous l'effet d'un champ électrique externe

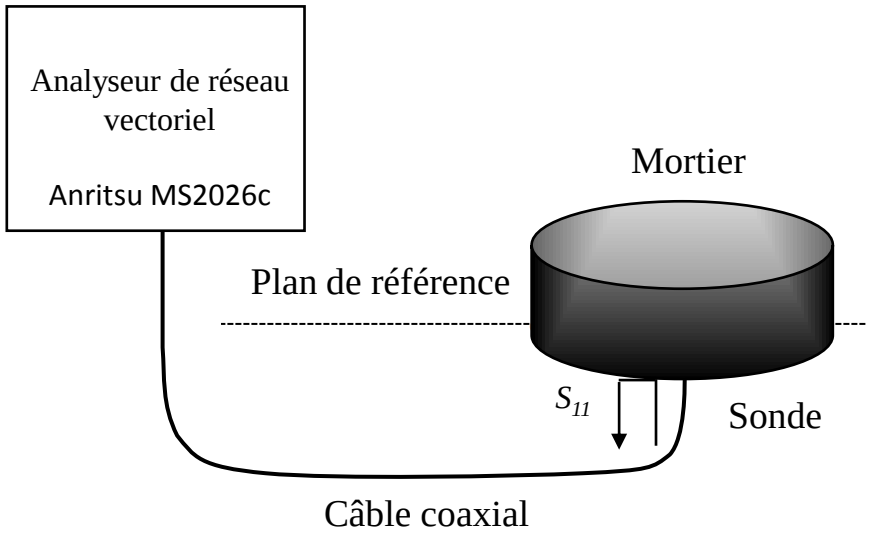
Milieu	$\mathrm{Re}\,(\varepsilon_r^*)$
Eau	≈ 80
Particules solides	$2 < \varepsilon_r < 15$
Air	1

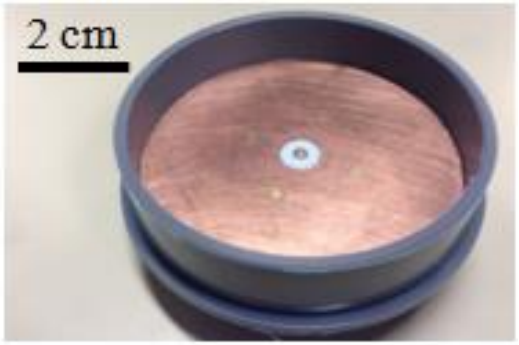
Spectroscopie diélectrique : Estimation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence du champ EM



Mesures de spectroscopie RF : Protocole expérimental

Banc de mesure

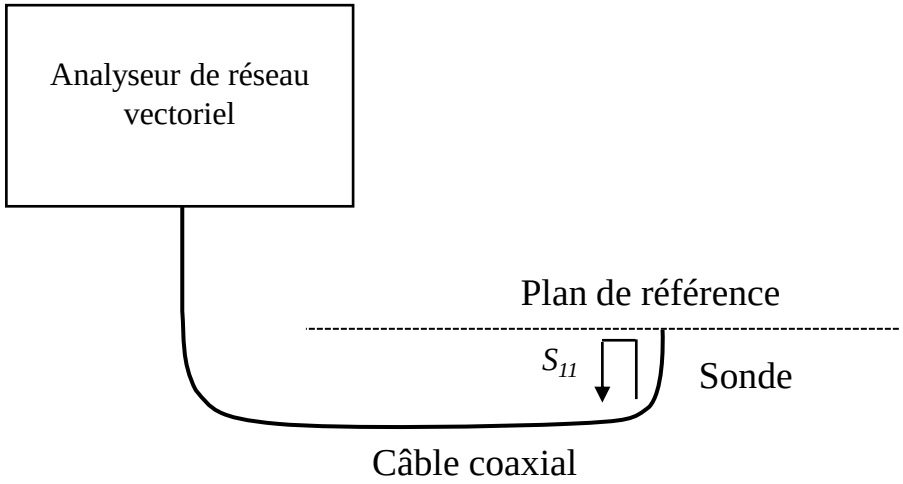




Sonde à effet de bout à connecteur N

Mesures de spectroscopie RF : Protocole expérimental

Etape 1 : calibrage du VNA



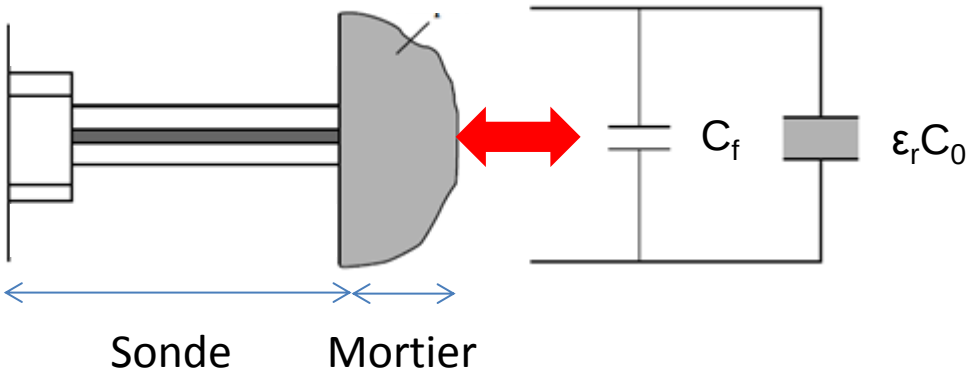
- Le calibrage permet de prendre en compte les imperfections du VNA et l'effet du câble (*)
- S_{11} : coefficient de réflexion de l'onde EM (grandeur mesurée).

(*) Calibrage de type OSL : Circuit ouvert, court circuit et 50 Ω

Mesures de spectroscopie RF : Protocole expérimental

Etape 2 : étalonnage de la sonde

- **Sonde à effet de bout à connecteur N**
  - Utilisation du modèle capacitif.



$$Y(\omega) = j\omega C_f(\omega) + j\omega C_0(\omega)\varepsilon_r(\omega)$$

$$\varepsilon_r(\omega) = \frac{c_1(\omega)S_{11}(\omega) - c_2(\omega)}{c_3(\omega) - S_{11}(\omega)}$$

Coefficients géométriques (c_1, c_2, c_3) à déterminer grâce à l'étalonnage

- **Etalonnage**
  - Liquides de référence (air, eau déionisée, méthanol/éthanol) de permittivités ε_r^* connues

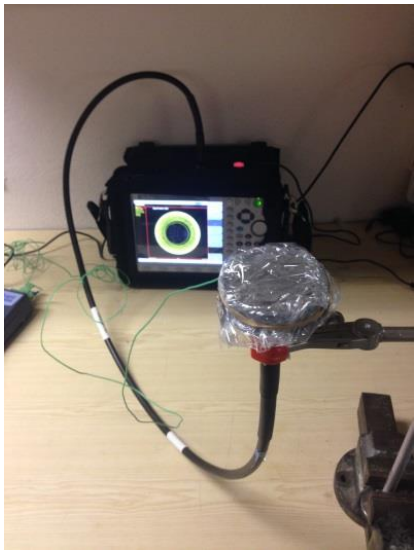
Mesures de spectroscopie RF : Mesures sur mortier

Etape 3 : mesures sur mortier (*)

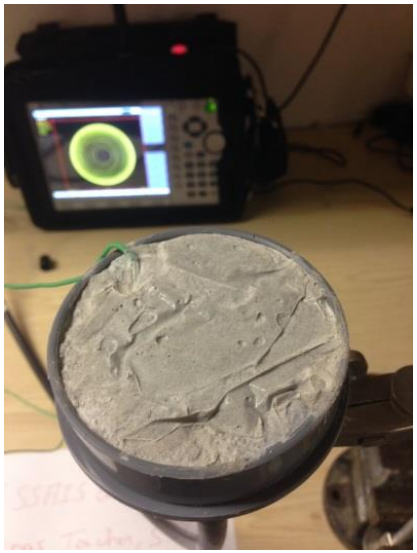
Mesure du coefficient S_{11} du mortier :

- Bande de fréquence : [600 kHz – 6 GHz]
- Nombre de points 4000

Phase 1 : Prise + hydratation(28 jours)



Phase 2 : Séchage (28 jours)



(*) Rapport eau/ciment : 0.5
Rapport sable/ciment : 2.5

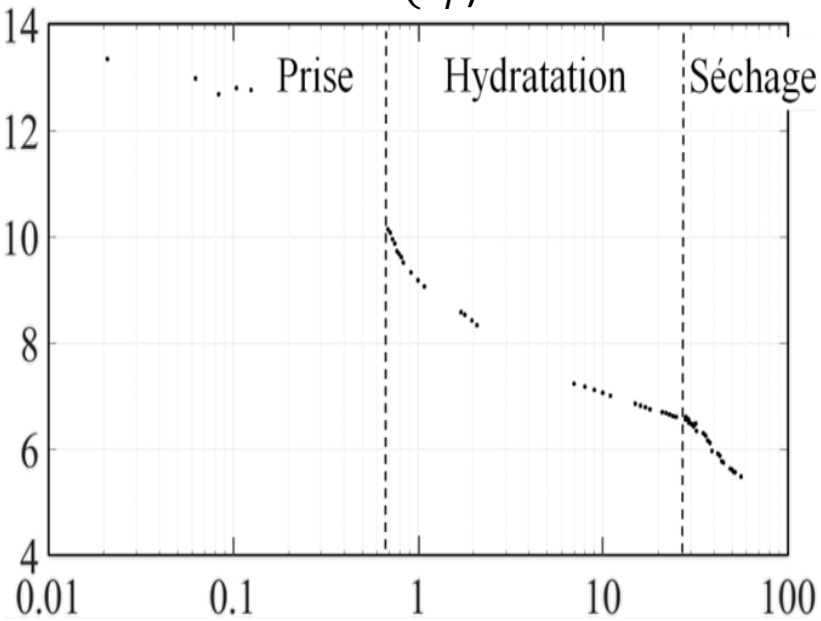
Mesures de spectroscopie RF : Mesures sur mortier

Etape 4 : résolution du problème inverse

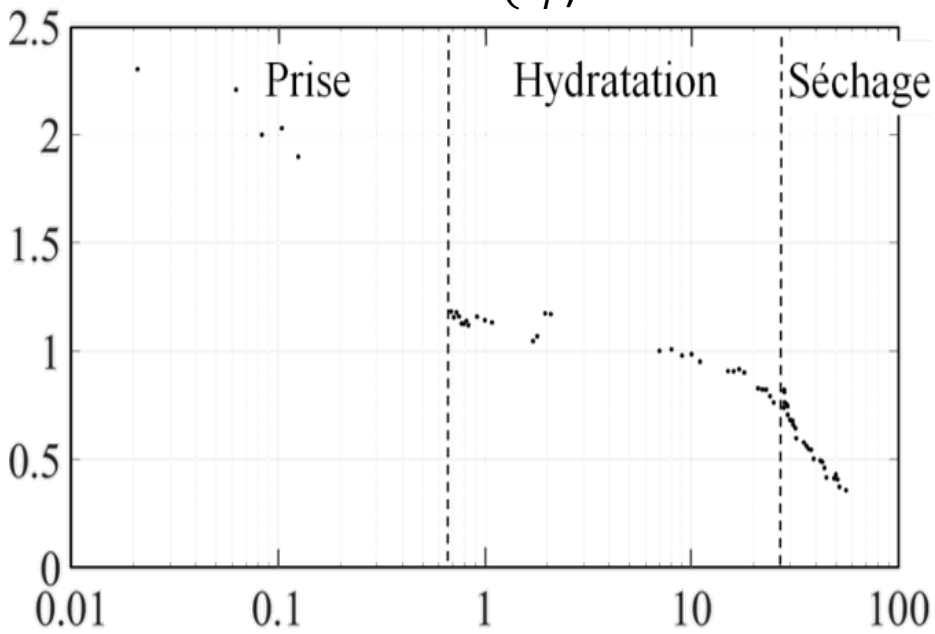
Variations de ε_r^* au cours du temps @ 5GHz

$$\varepsilon_r(\omega) = \frac{c_1(\omega)S_{11}(\omega) - c_2(\omega)}{c_3(\omega) - S_{11}(\omega)}$$

$\mathrm{Re}\,(\varepsilon_r^*)$



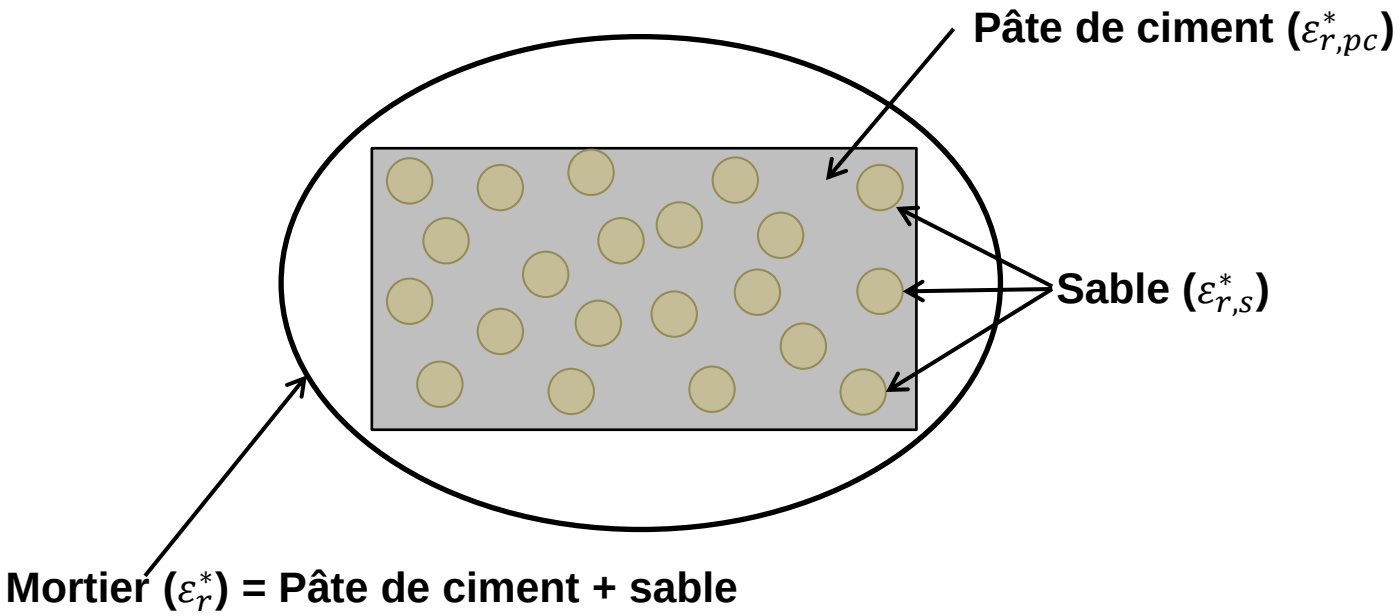
$-\mathrm{Im}\,(\varepsilon_r^*)$



Les phases de prise, d'hydratation et séchage sont clairement identifiables

Modélisation : lois de mélange

Problématique : Prévoir ε_r^* du mortier par des modèles physiques

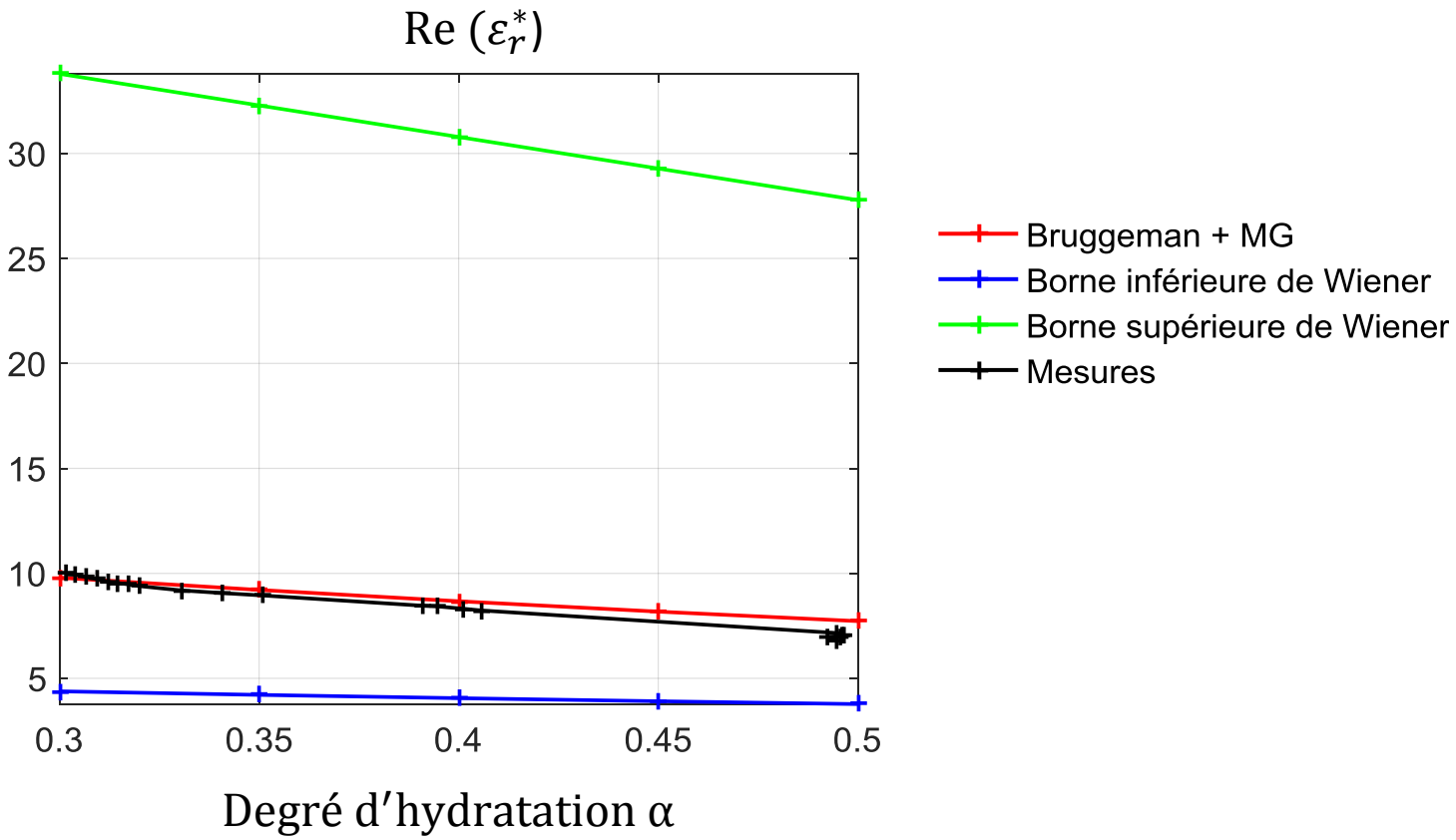


$\varepsilon_{r,pc}^*$: obtenue avec **la loi de Bruggeman**

ε_r^* : obtenue avec **la loi de Maxwell-Garnett**

Modélisation : lois de mélange

Variation de la permittivité en fonction du degré d'hydratation du mortier



Bonne adéquation entre le modèle et les mesures

Conclusion et perspectives

Conclusion

- Développement d'une méthode EM RF pour le suivi de l'hydratation d'un mortier
  - Mise en évidence des phases de prise d'hydratation et de séchage
- Application de lois de mélange pour estimer ε_r^* d'un mortier
  - Bonne adéquation entre les mesures et le modèle utilisé

Perspectives

- Etudier d'autres compositions de mortiers

EPSILON ALCEN

digital for physics

Caractérisation thermique de pièces complexes 3D en utilisant un bras robotisé 6 axes couplé à une excitation laser pulsé

M. Romano [1], J. Malvaut [2], T. Bazire [2], A. Sommier [3], V. Delos [3], J.C. Batsale [3] et C. Pradere [3]

1 EPSILON - Groupe ALCEN, Site ENSAM - Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex.

2 KUKA Systems Aerospace, 80 Avenue de Magudas, 33185 Le Haillan, France.

3 I2M-TREFLE, UMR CNRS 5295, Esplanade des Arts et Métiers 33405 Talence Cedex, France.

ISO 9001:2015 BUREAU VERITAS Certification

I2M BORDEAUX

KUKA

EPSILON ALCEN

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

EPSILON

Une société du groupe ALCEN, orienté “High Tech”

ALCEN

- 22 subsidiaries
- 2000 people
- Revenue : 240M€

11 technologies

- Assemblage
- Chimie & biochimie
- Electromagnétisme
- Environnement radioactif
- Matériaux
- Nano technologies
- Puissance
- Subaquatique
- Systèmes embarqués
- Thermique
- Optique

4 domaines

- Défense & Sécurité
- Energie
- Médical
- Aéronautique

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

EPSILON : Les éléments clefs

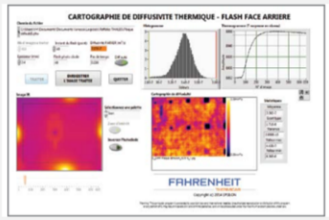
- **25 ans** d'expérience comme bureau d'études
- **« Approche de niche »**
- **120** Ingénieurs experts en donc **35 à Bordeaux**
  * Thermique et instrumentation
  * Informatique Technique (Data Processing & AI)

EPSILON PHYSICS SOFTWARE

COMMON LAB WITH:

cnrs

3 groups of algorithms based on physics & science



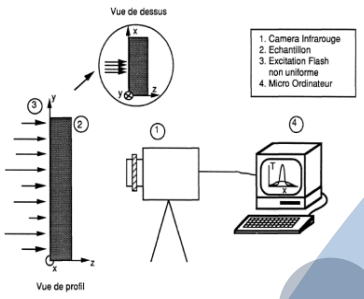
Sensor drivers

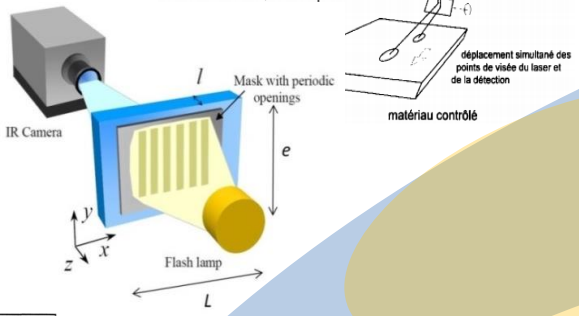
Data Processing

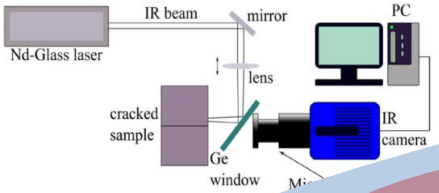
Parameters Estimation

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Review of existing methods







Heat pulse laser

- Bison *et.al*, *2008*
- Pradere *et.al*, 2011
- Kruczek *et.al*, 2015
- Salazar *et.al*, 2016

Constant Velocity Laser Scan

- Krapez *et.al*, 1999
- Almond *et.al*, 2010

Spatial non homogeneous Flash

- Krapez *et.al*, 2000
- Batsale *et.al*, 2004
- Maldague *et.al*, 2002

Rear and front Face Flash Method

Balageas *et.al*, 2012
Shepard *et.al*, 2001

Flash Method,
Parker,1961.

Advantage

- ***High power density and thermal gradient***

Drawback

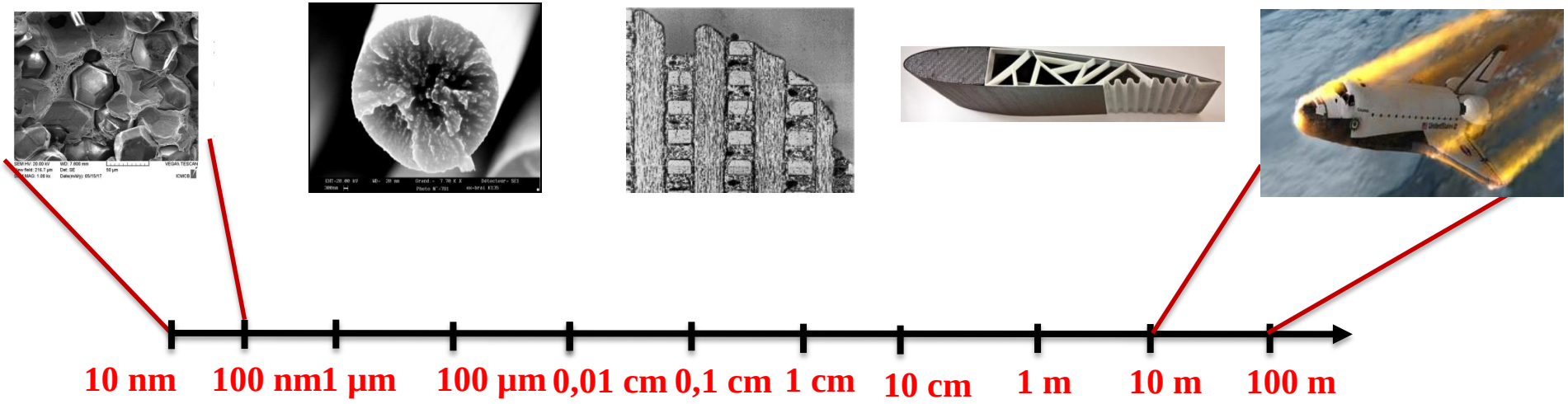
- ***Only one estimation of thermal diffusivity in homogeneous sample of simple shape***

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Goal of our team

Study thermal characterization of multiscale heterogeneous materials

Copper-Diamond Composite L ≈ 10 nm	Carbon fibers Diameter L ≈ 10 µm	3D stratified composite L ≈ 1 cm	Aircraft Wing L > m	Spaceship L > 10 m



Difficulties:

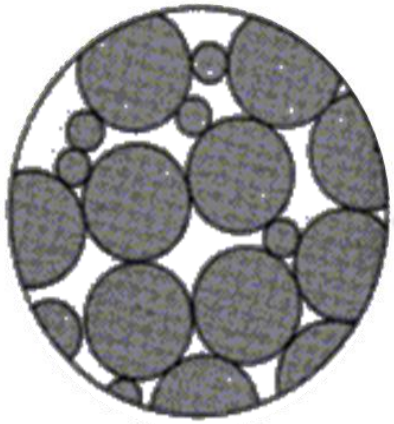
To perform quantitative estimations of in-plane thermal diffusivities fields on multiscale, heterogeneous and anisotropic materials

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

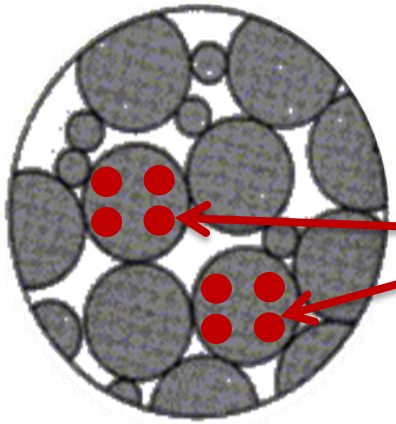
Scientific strategy

Break down the problem into homogeneous media by parts

Heterogeneous and anisotropic media



Laser Heat Pulse in Representative Elementary Volume (R.E.V)



High thermal gradient at the surface of the sample

Use IR thermography for fields imaging and estimation

To develop set-up and methods :

Laser optical scanner for positioning in REV
Infrared camera for multiscale imaging
Analytical methods based on separable solutions

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Experimental set-up: Flying Spot

Component

a) IR Laser diode: 976 nm and 330 mW

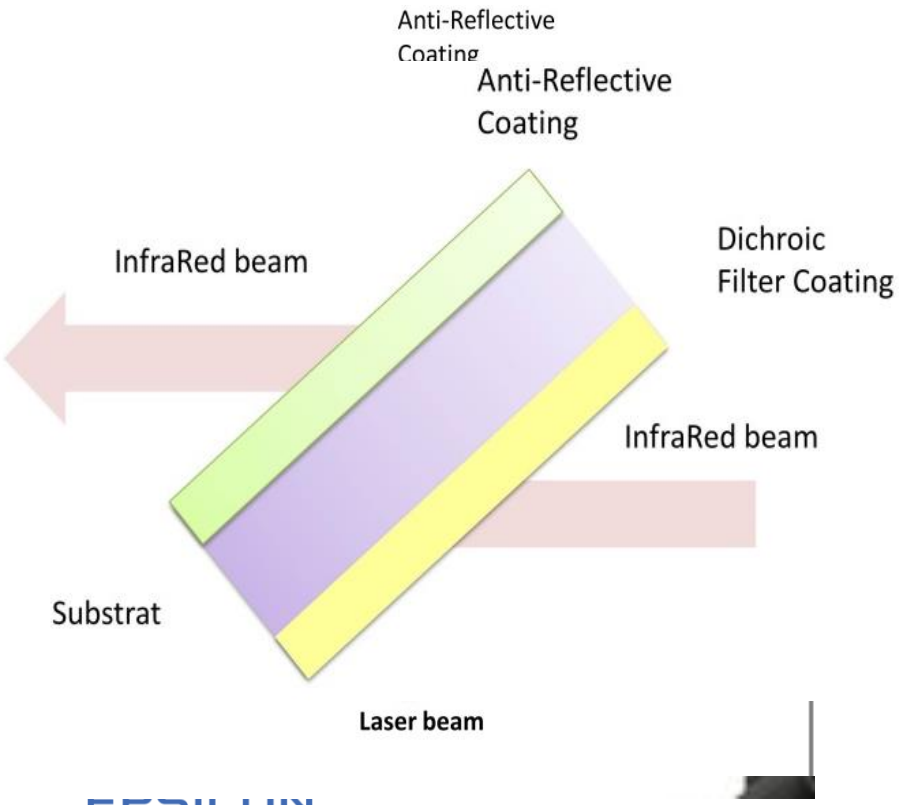
b) Galvanometric miror

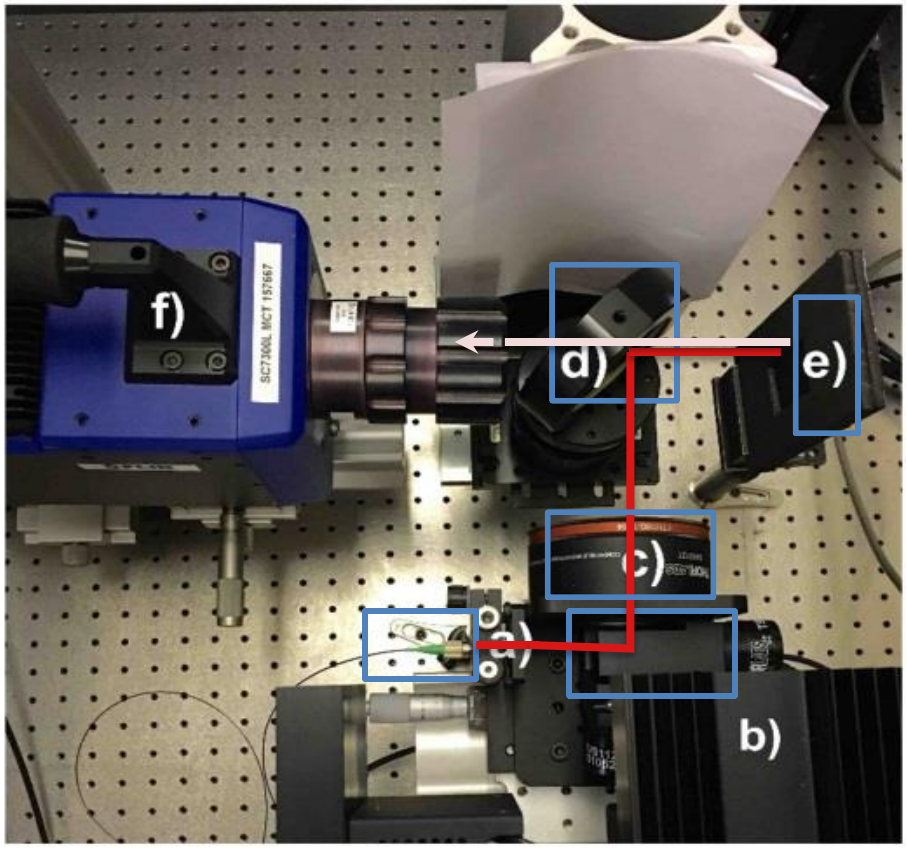
c) F-theta lens

d) Dichroic miror

e) Sample

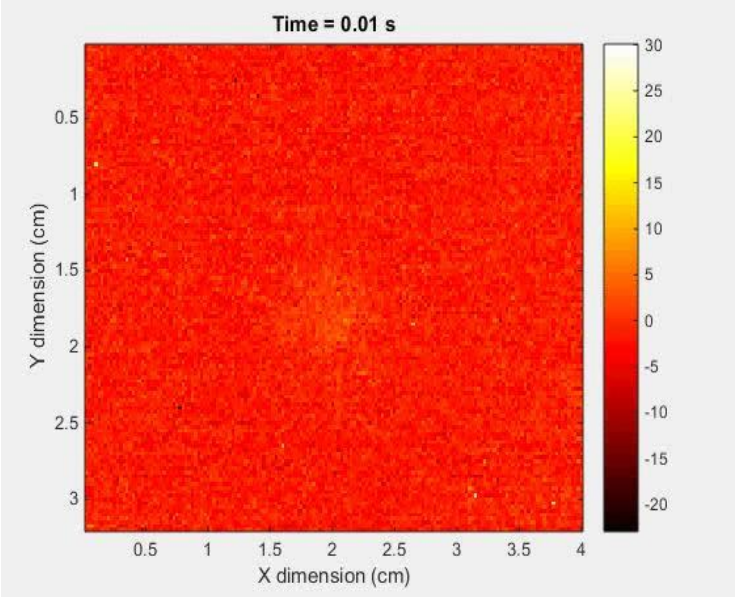
f) MCT IR (FLIR SC7000) 320*256 pixels, pitch 30 µm





This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Experimental set-up: Scanning configurations



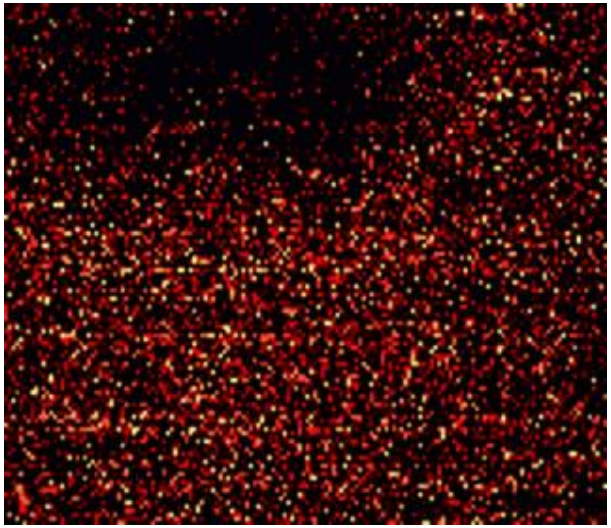
Known →Pulsed Spot (PS)

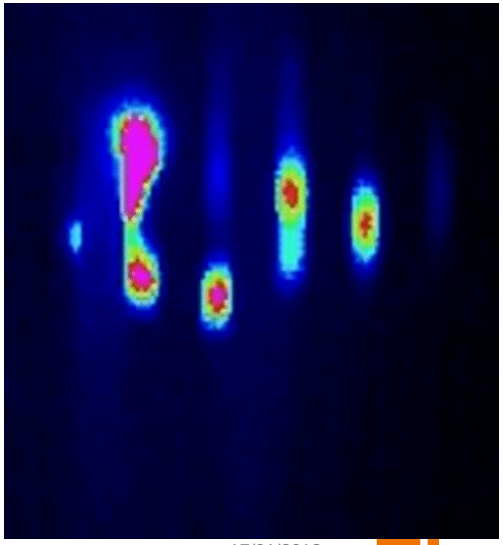
To Grid Pulsed Flying Spot (GPFS)

To Lock-in Pulsed Flying Spot (LPFS)

To Constant Velocity Flying Spot (CVFS)

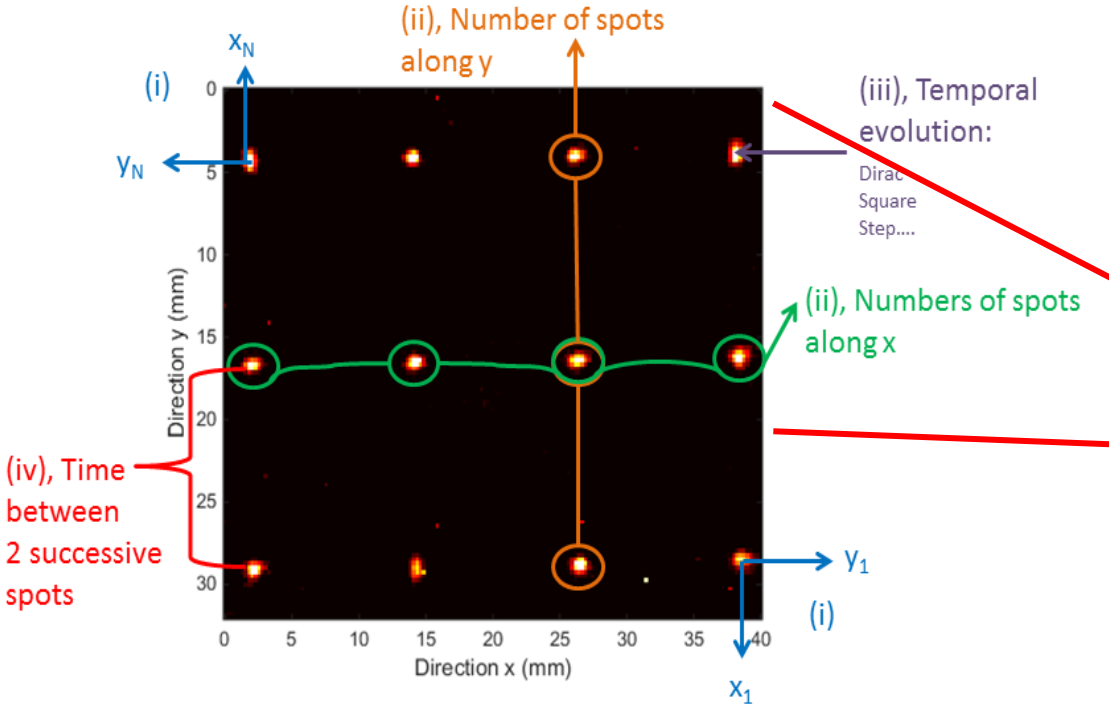
To Random Pulsed Flying Spot (RPFS)

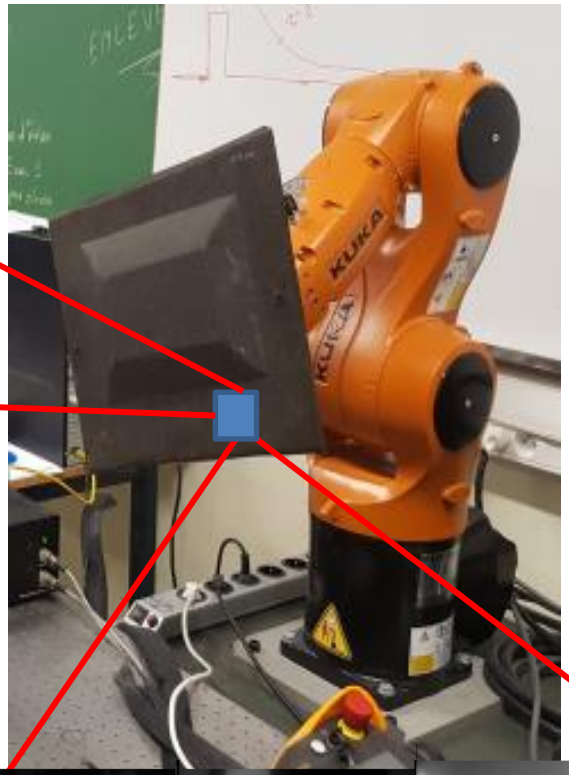


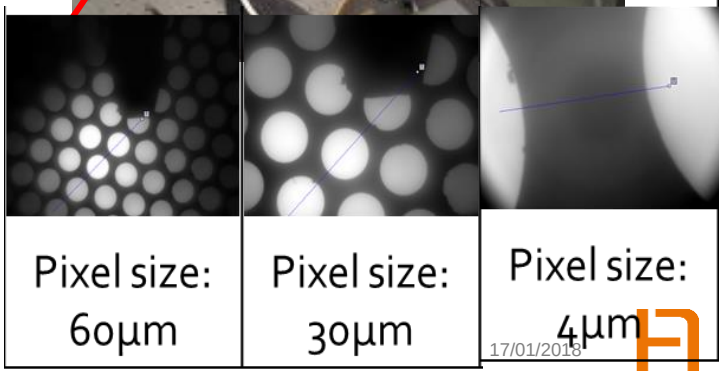


This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Experimental set-up: Multiscale approach + Scanning with robot







Scanning performances :

Scanning area : 60 mm x 40 mm
Laser spot: < 18 µm
Scanning rate: up to 1000 Hz
Spatial image resolution: from 4 µm to 250 µm
Robot: 6 axes, up to 2 m/s and 360°/s

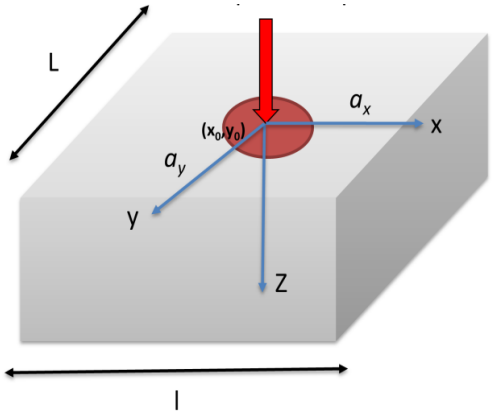
EPSILON ALCEN

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Inverse processing based on Logarithmic Parabolas Method

Direct thermal problem

Heat Pulsed Spot



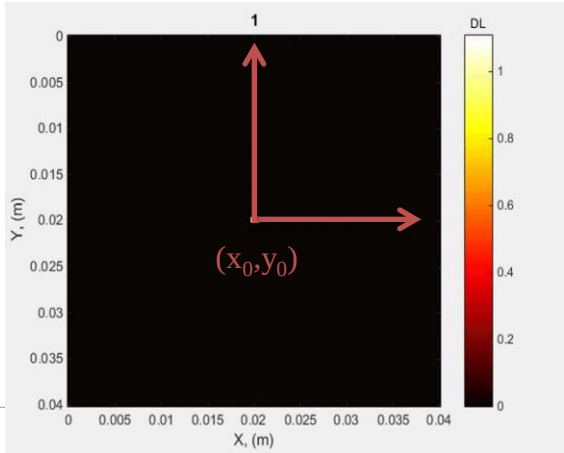
Analytical solution of the 3Dt temperature field [1]

$$T(x,y,z,t)=\frac{Q}{\rho c}\frac{exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{4a_{xx}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{xx}t}}\frac{exp\left(\frac{-(y-y_0)^2}{4a_{yy}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{yy}t}}\frac{exp\left(\frac{-z^2}{4a_{zz}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{zz}t}}$$

Separability properties along x, y and z

$$T(x,y,z,t)=T_x\cdot T_y\cdot T_z$$

IR temperature field



Space average following the x and y directions is considered

$$\begin{cases}\overline{T}_y=\dfrac{Q}{\rho c}\dfrac{exp\left(-\dfrac{(x-x_0)^2}{4a_{xx}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{xx}t}}\dfrac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}}\\ \overline{T}_x=\dfrac{Q}{\rho c}\dfrac{exp\left(-\dfrac{(y-y_0)^2}{4a_{yy}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{yy}t}}\dfrac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}}\end{cases}$$

[1] Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959).

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Inverse processing based on Logarithmic Parabolas Method

Inverse processing

Logarithmic decomposition

$$\begin{cases} ln(\bar{T}_y) = ln\left(\dfrac{Q}{\rho c\sqrt{\pi a_{zz} t}}\right) - \dfrac{(x-x_0)^2}{4a_{xx}t} \\ ln(\bar{T}_x) = ln\left(\dfrac{Q}{\rho c\sqrt{\pi a_{zz} t}}\right) - \dfrac{(y-y_0)^2}{4a_{yy}t} \end{cases}$$

Parabolic formulation

$$\begin{cases} ln(\bar{T}_y) = \beta_0(t) + \beta_1(t)x + \beta_2(t)x^2 \\ ln(\bar{T}_x) = \beta_0(t) + \beta_1(t)y + \beta_2(t)y^2 \end{cases}$$

Analytic formulation of the parabolic coefficients

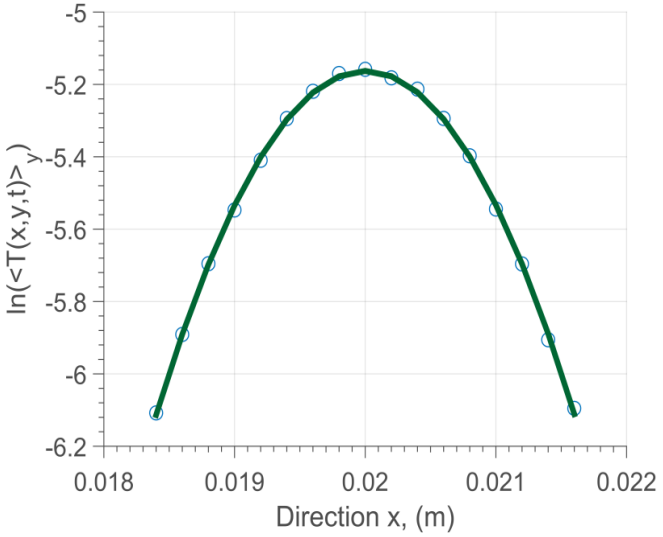
$$\begin{cases} \beta_2(t) = -\dfrac{1}{4a_{xx}t} ou -\dfrac{1}{4a_{yy}t} \\ \beta_1(t) = \dfrac{x_0}{2a_{xx}t} ou \dfrac{y_0}{2a_{yy}t} \\ \beta_0(t) = -\dfrac{x_0^{\,2}}{4a_{xx}t} + ln\left(\dfrac{Q}{\rho c\sqrt{\pi a_{zz} t}}\right) \\ ou -\dfrac{y_0^{\,2}}{4a_{yy}t} + ln\left(\dfrac{Q}{\rho c\sqrt{\pi a_{zz} t}}\right) \end{cases}$$

Inverse processing

Gauss-Markov theorem

$$\hat{\beta} = \left(X^T W X\right)^{-1} X^T W \ln\left(\bar{T}_\xi\right)$$

Estimation of parabolic coefficients



This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

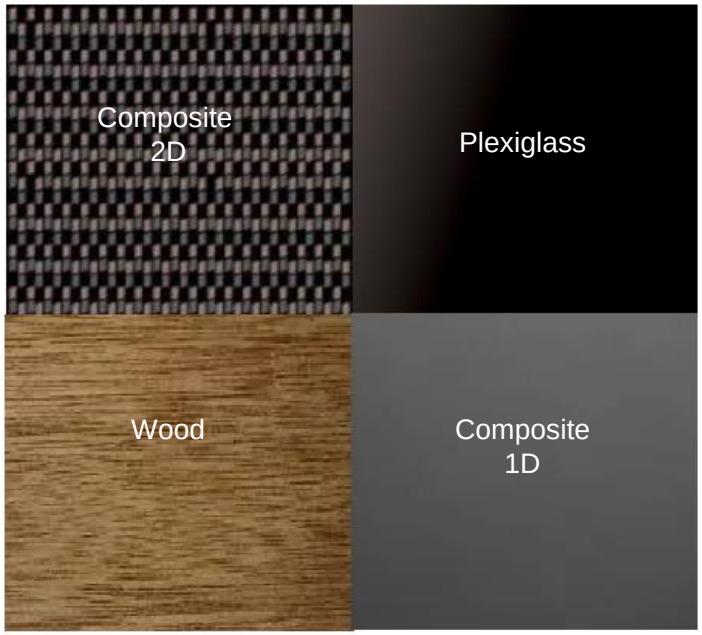
Experimental validation of Grid Pulsed Flying Spot and LP

Heterogeneous and orthotropic sample

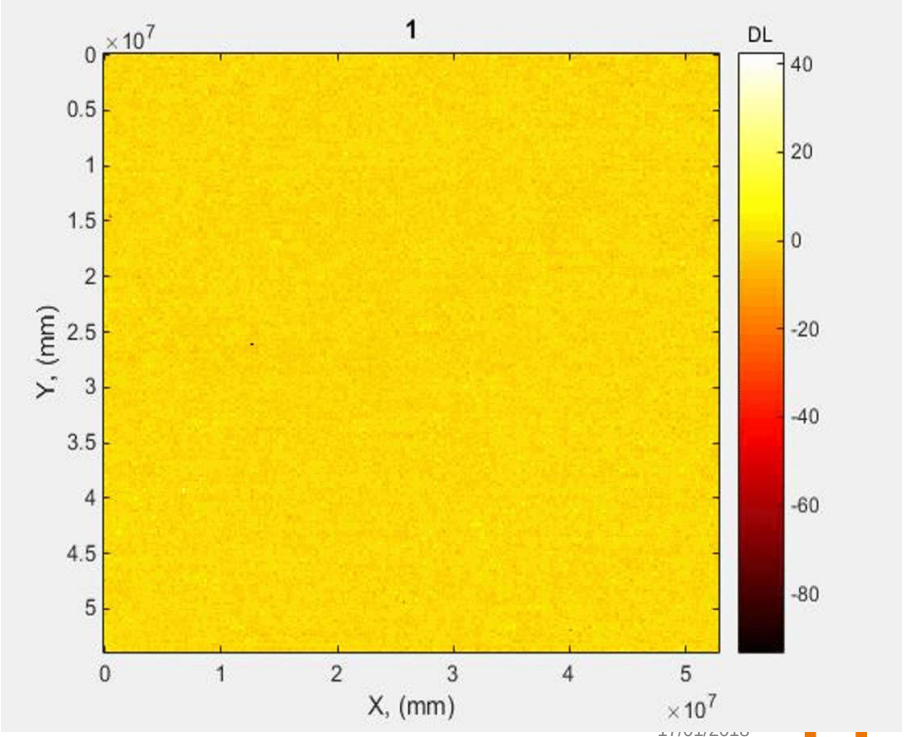
Scanning with Grid Pulsed Flying Spot (GPFS)

Huge amount of laser spot

Heterogeneous sample



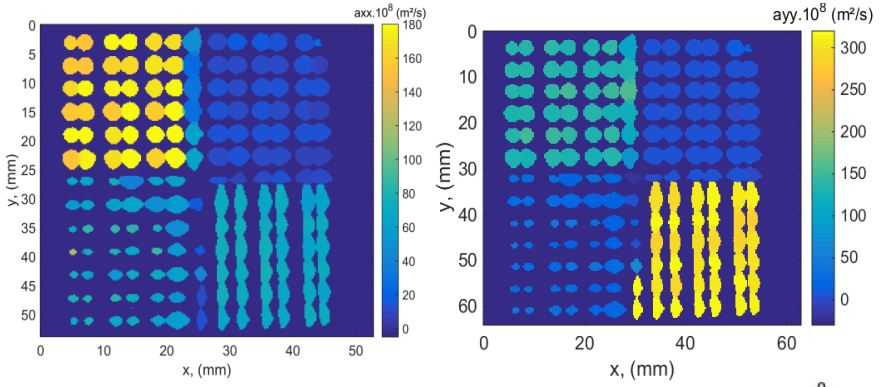
Grid Pulsed Flying Spot



This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

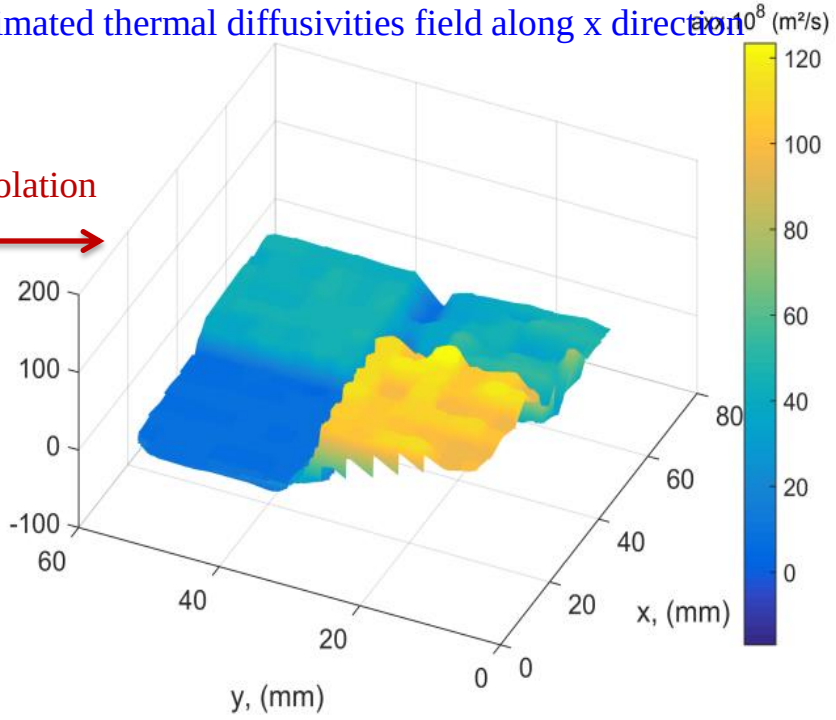
Experimental validation of Grid Pulsed Flying Spot

Thermal diffusivities fields after 196 scans

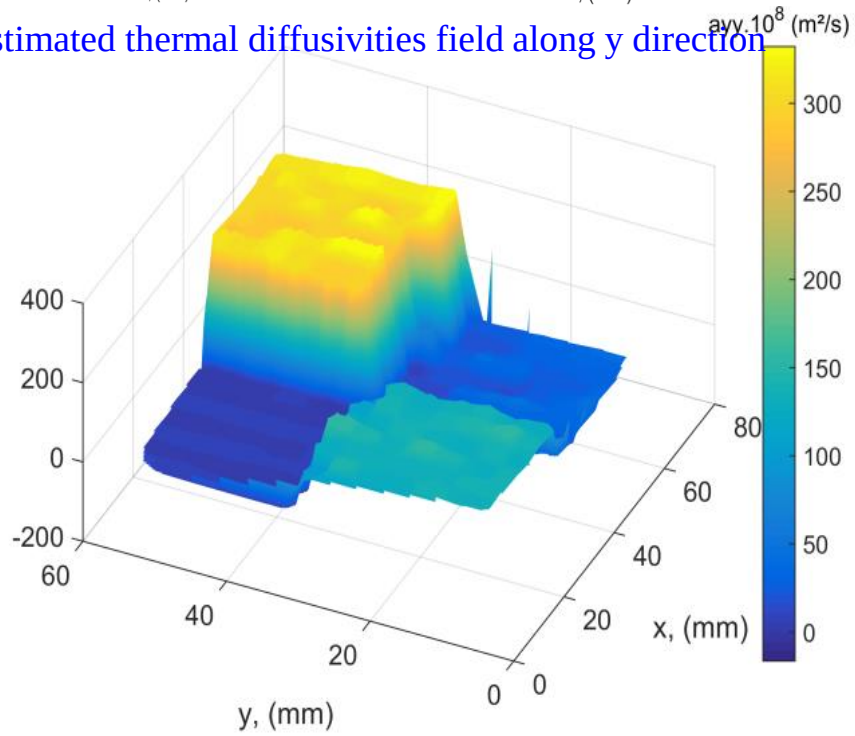


Interpolation

Estimated thermal diffusivities field along x direction



Estimated thermal diffusivities field along y direction



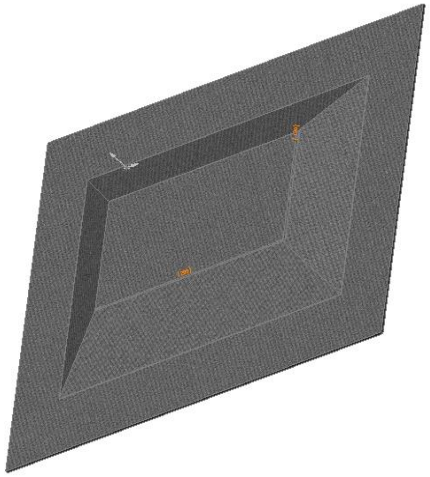
Measurements duration: 10 s
Processing: 1 s
196 estimations of in-plane diffusivites fields

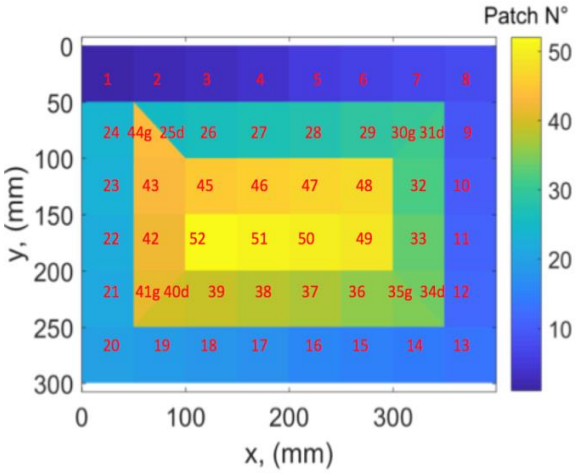
This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Application to complex shape composite material

From CAD to IR normal monitoring of the complex shape

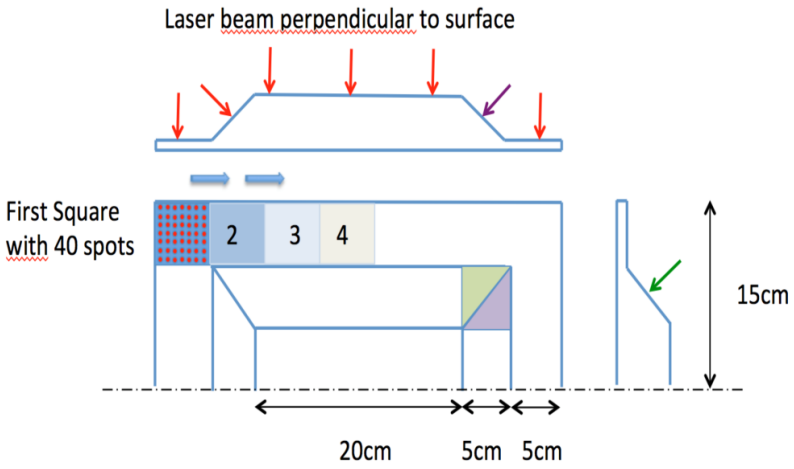
Design of the composite true shape by CAD



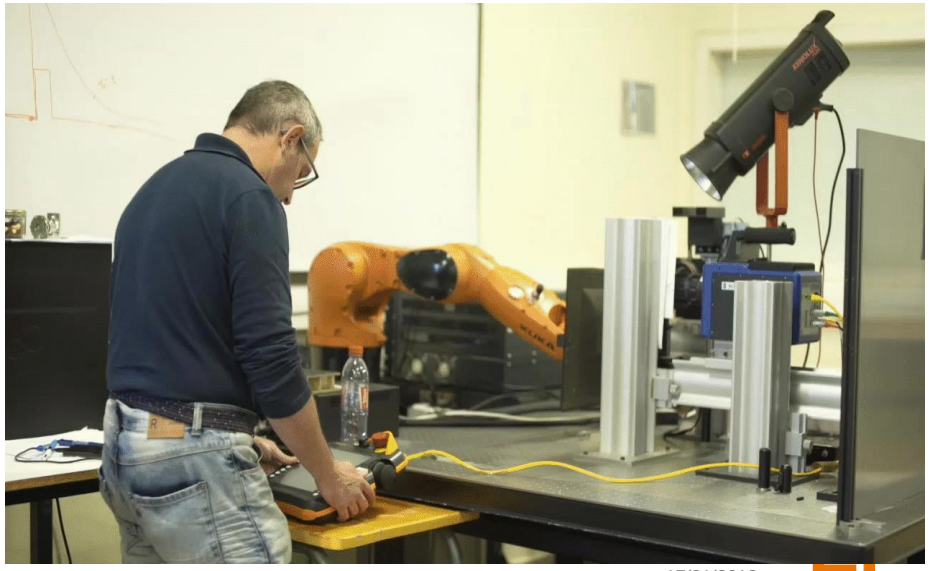


Algorithms programming with Kuka Software

Choice of the different ROI linked with the composite shape



Results

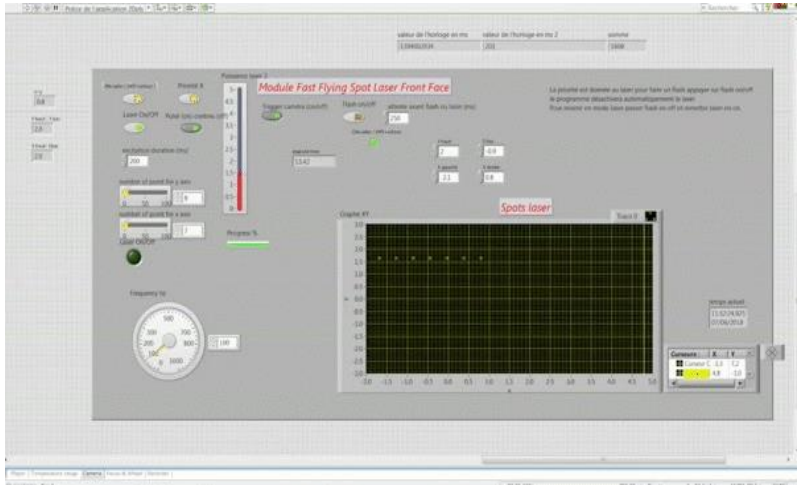


This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Application to complex shape composite material

From CAD to IR normal monitoring of the complex shape

Grid Pulsed Flying Spot on the different

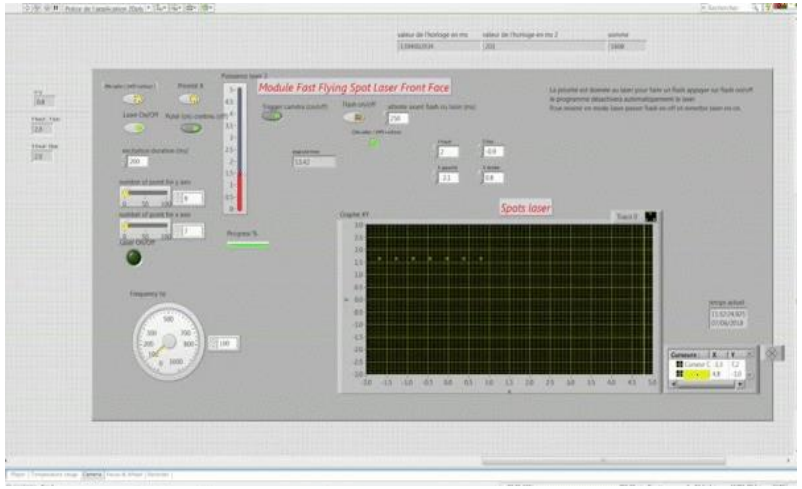


This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

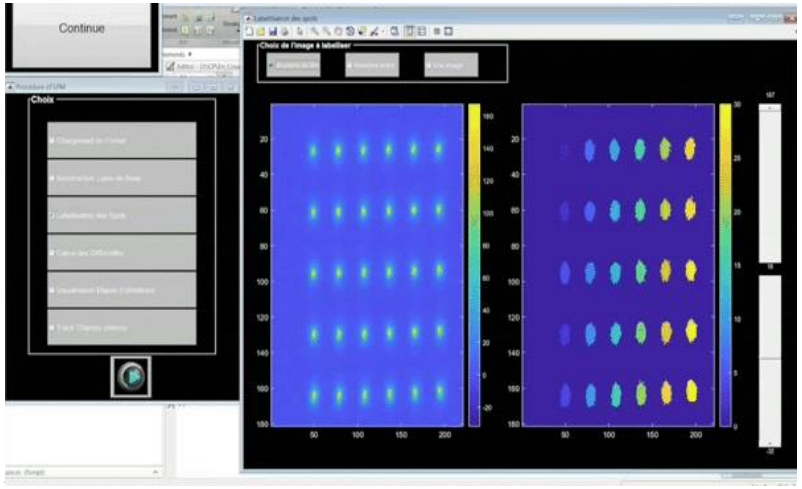
Application to complex shape composite material

From CAD to IR normal monitoring of the complex shape

Grid Pulsed Flying Spot on the different



+ online processing on the different ROI

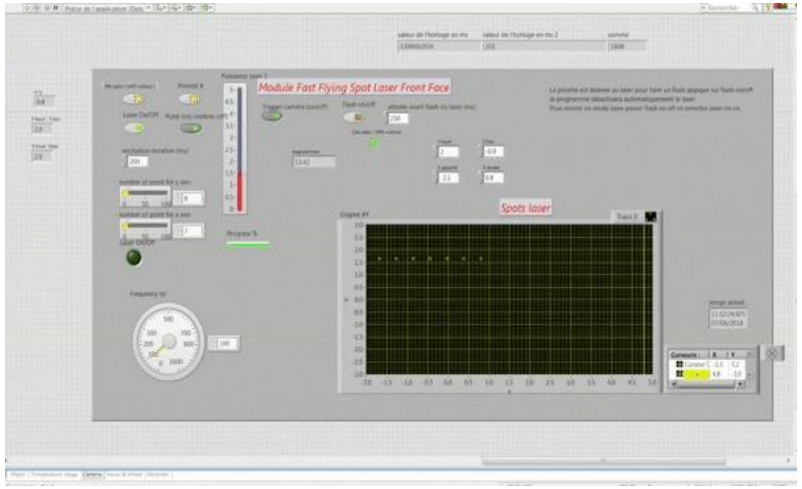


This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

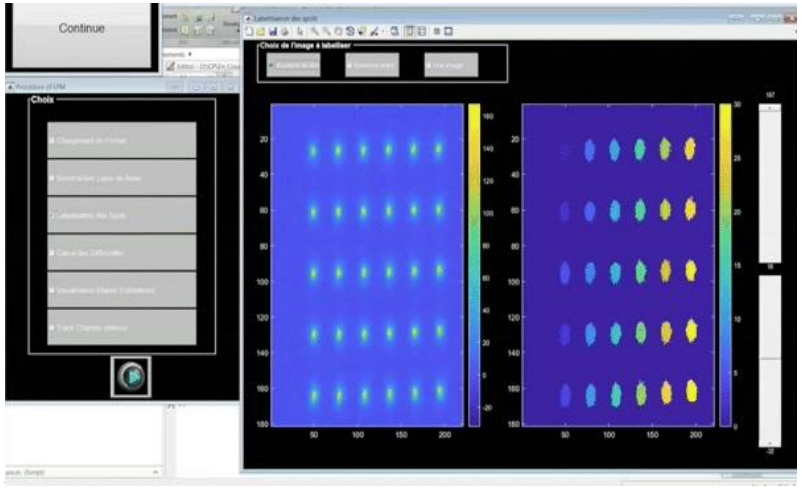
Application to complex shape composite material

From CAD to IR normal monitoring of the complex shape

Grid Pulsed Flying Spot on the different



+ online processing on the different ROI



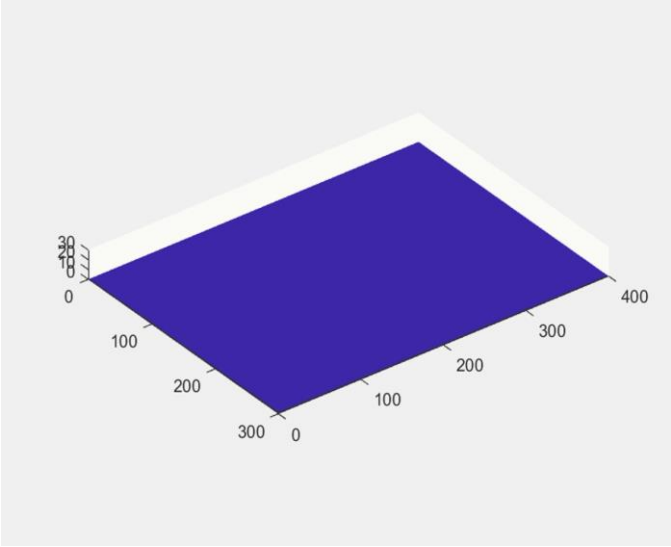
= Complete Flying Spot scanning of the sample (15 min)

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

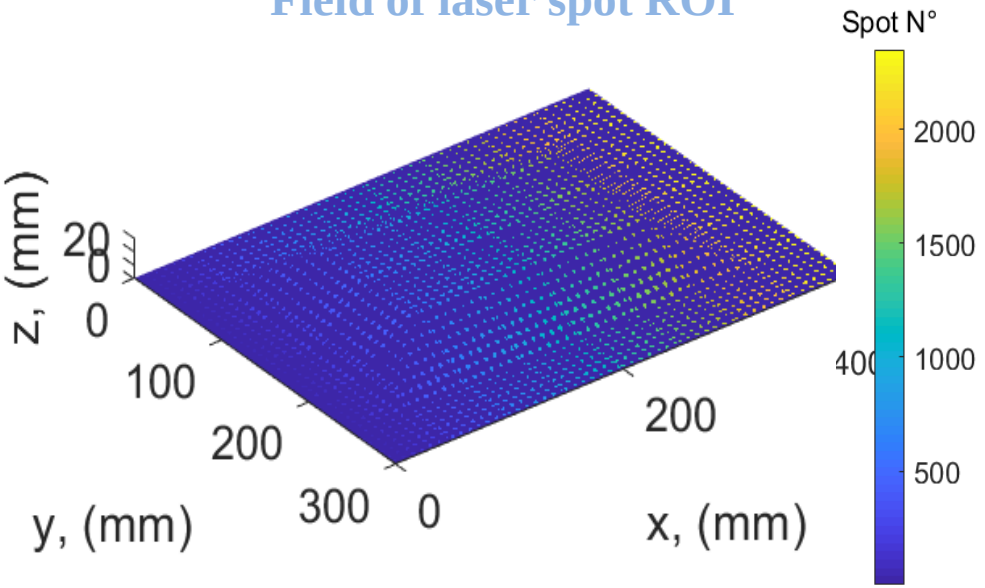
Application to complex shape composite material

Results after texture mapped reconstruction on the complex sample

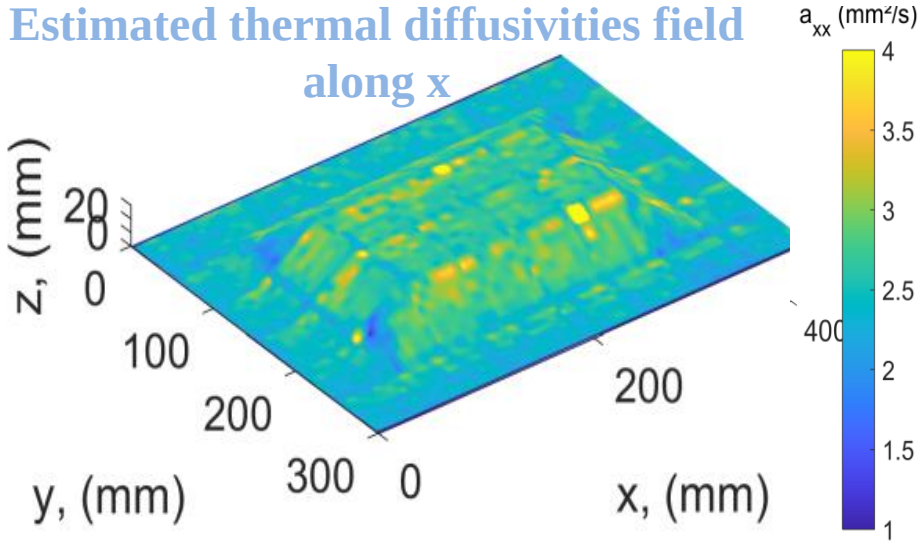
Video of the complete Flying Spot scanning



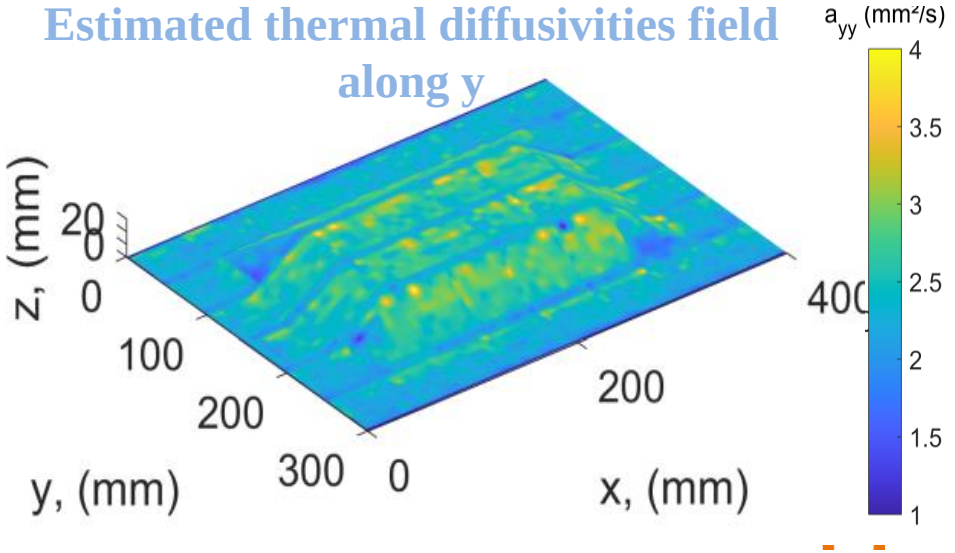
Field of laser spot ROI



Estimated thermal diffusivities field along x



Estimated thermal diffusivities field along y



This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Conclusion

Development of high versatile Flying Spot set-up

Logarithmic analytical method for in-plane thermal diffusivities fields estimation of anisotropic materials

Applications

Tools for real time industrial Quantitative NDT

Performances and drawback

Very good spatial resolution down to 1 mm

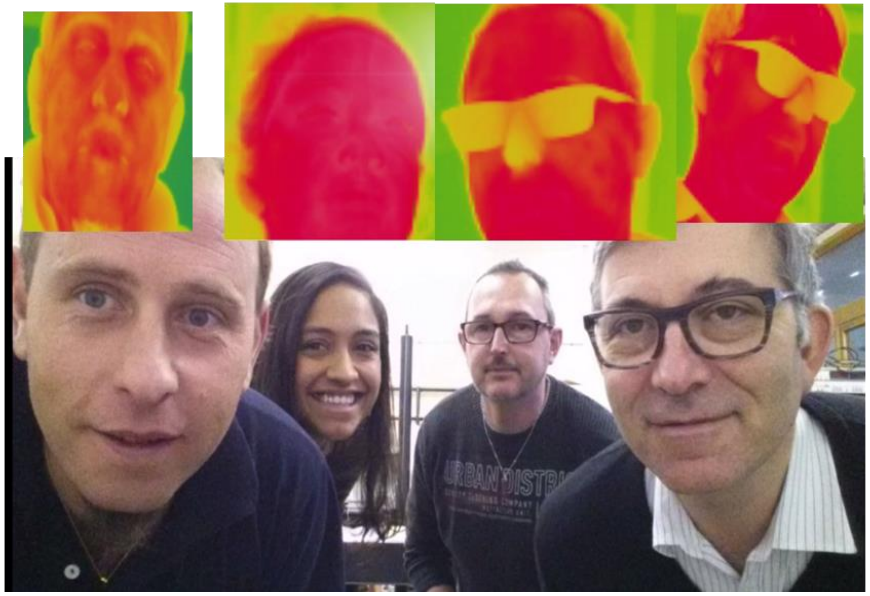
Time analysis strongly linked to the sample thermal properties

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Thank you for your attention

Local authors

C. Pradere M. Romano A. Sommier J.C. Batsale



COMMON RESARCH

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Back-up slides

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Back-up slides

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Back-up slides

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Back-up slides

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Back-up slides

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Back-up slides

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

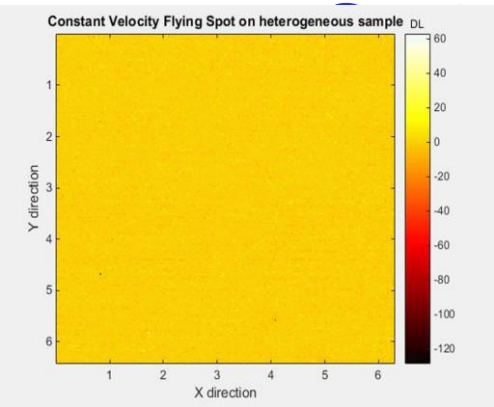
Back-up slides

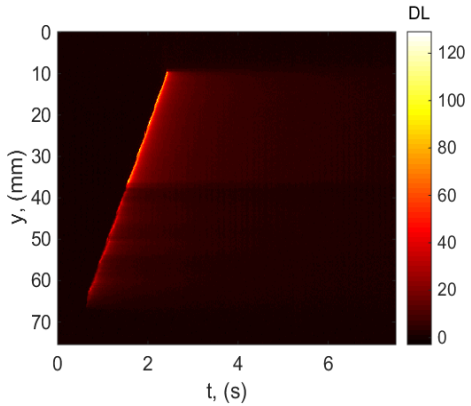
This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Perspectives

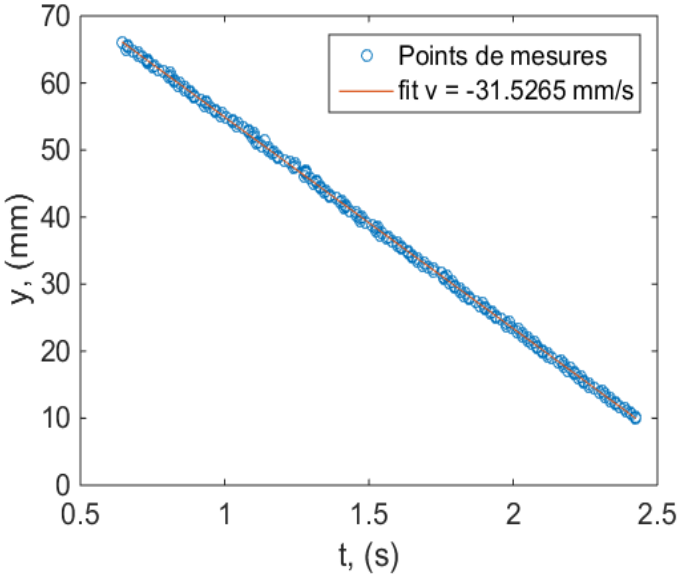
Photothermal Techniques Laboratory

From Grid Pulsed Flying

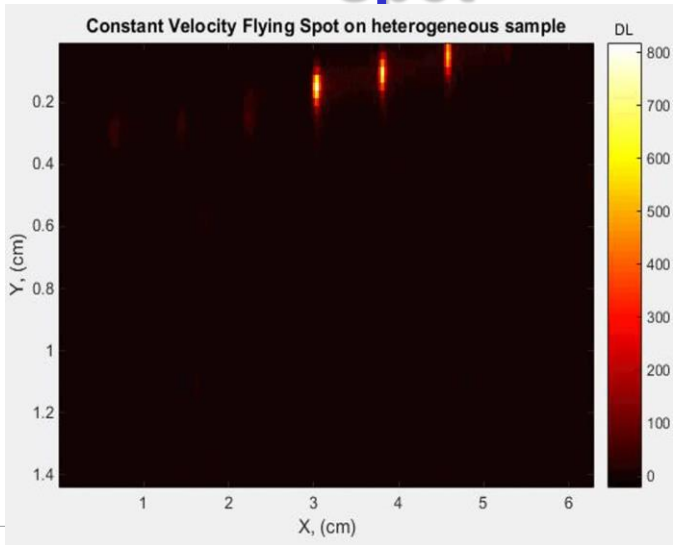




Change of mark by velocity estimation



To Constant velocity Flying Spot



New formulation, of the thermal problem….

$$T(x,y,z) = \frac{Q}{\rho c e} \frac{exp\left(-\frac{v(x-x_0)^2}{4a_{xx}y}\right)}{\sqrt{\frac{\pi a_{xx} y}{v}}} \frac{exp\left(-\frac{vz^2}{4a_{zz}y}\right)}{\sqrt{\frac{\pi a_{zz} y}{v}}}$$

EPSILON ALCEN

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Experimental validation of Constant Velocity Flying Spot

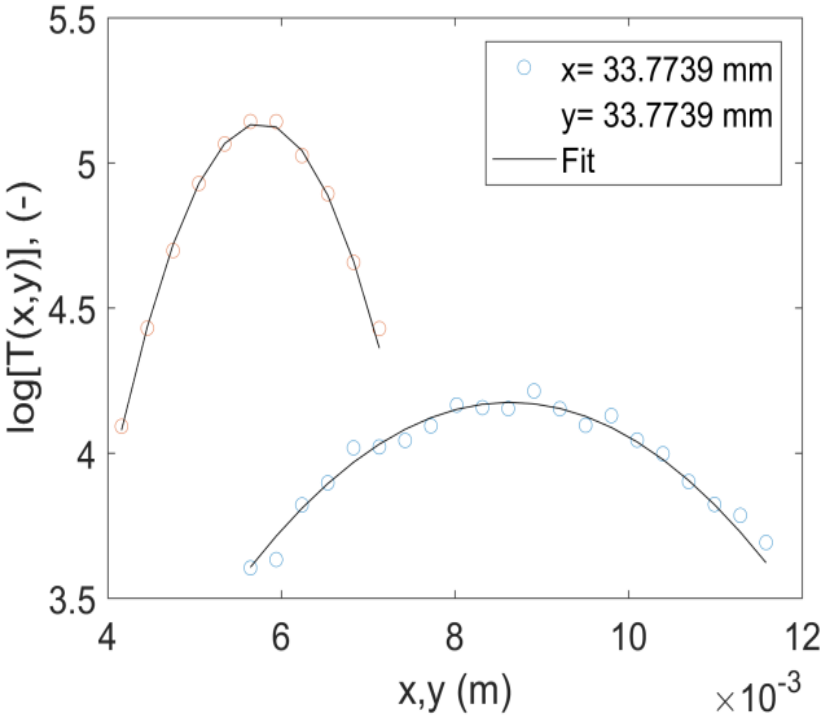
Photothermal Techniques Laboratory

Formulation of the logarithmic coefficient of the parabola

Gauss-Markov

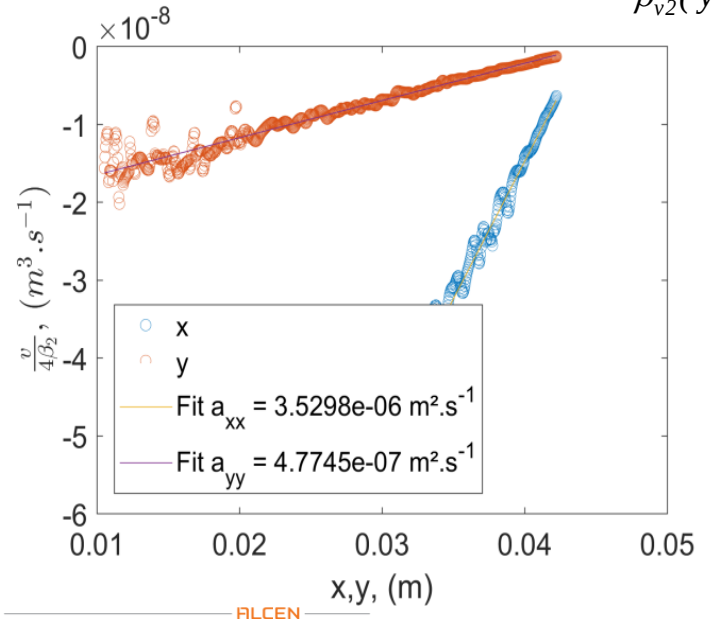
$$\begin{cases} \beta_{v2}(y) = -\dfrac{v}{4a_{xx}y} \\ \beta_{v1}(y) = \dfrac{vx_0}{2a_{xx}y} \\ \beta_{v0}(y) = -\dfrac{vx_0^{\,2}}{4a_{xx}y} + ln(K) \end{cases}$$

Estimation of parabolas for the two media



Real time estimation

$$\frac{1}{\beta_{v2}(y)} = -\frac{4a_{xx}}{v}y$$

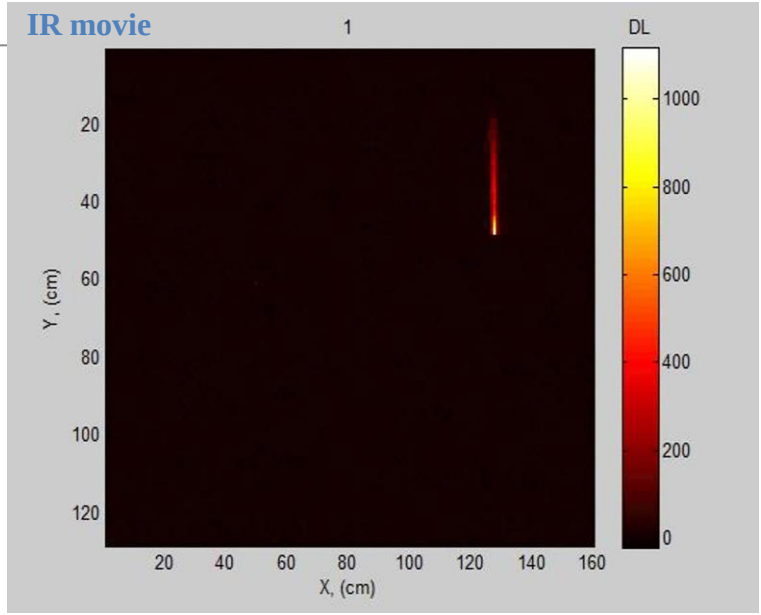


Real time thermal diffusivities tensor estimation: 10 s
Up to 1000 estimations of in-plane diffusivities fields in heterogeneous media

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

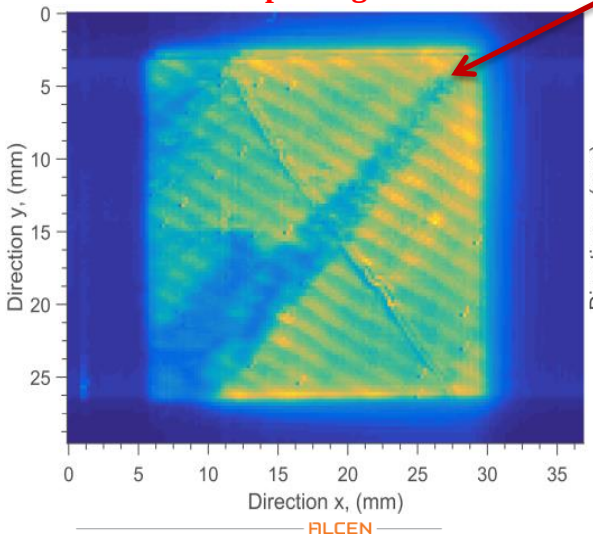
NDT applied to art inspection with Constant Velocity Flying Spot

Sample

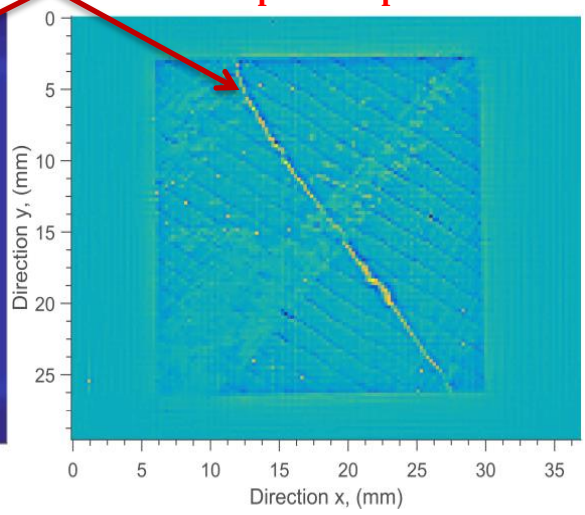


Crack

Use of spatial gradient



Use of spatial Laplacian



How to go from qualitative NDT to quantitative thermal characterization

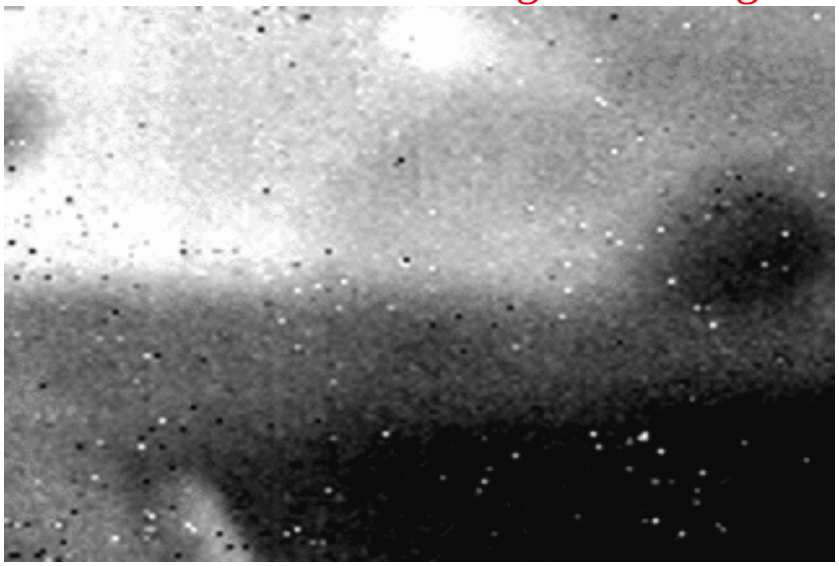
This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Industrial application

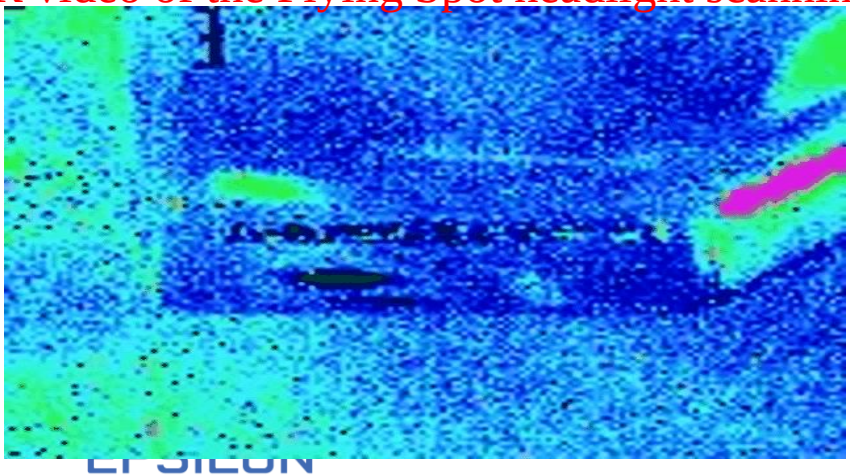
Smart QNDT of complex sample by Kuka robot

Visible video of headlight scanning

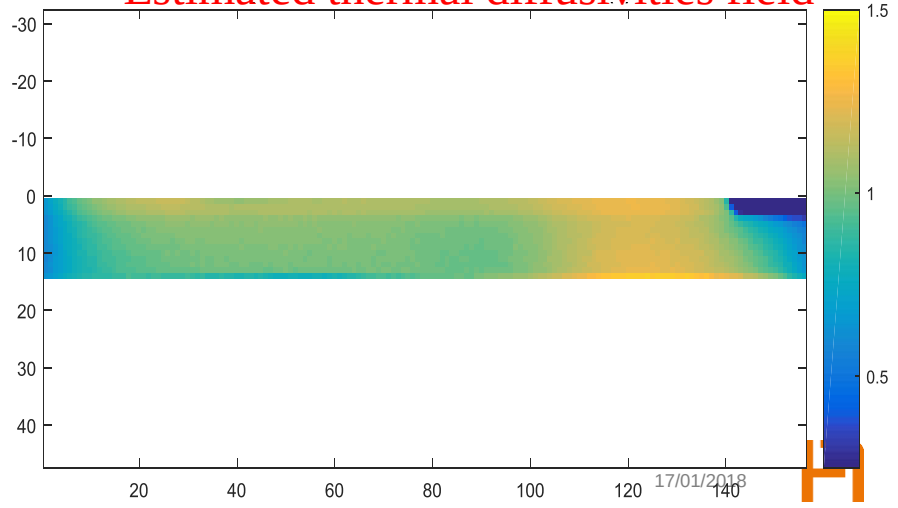
IR video of headlight scanning



IR video of the Flying Spot headlight scanning



Estimated thermal diffusivities field



This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Inverse processing based on Logarithmic Parabolas Method

Inverse processing

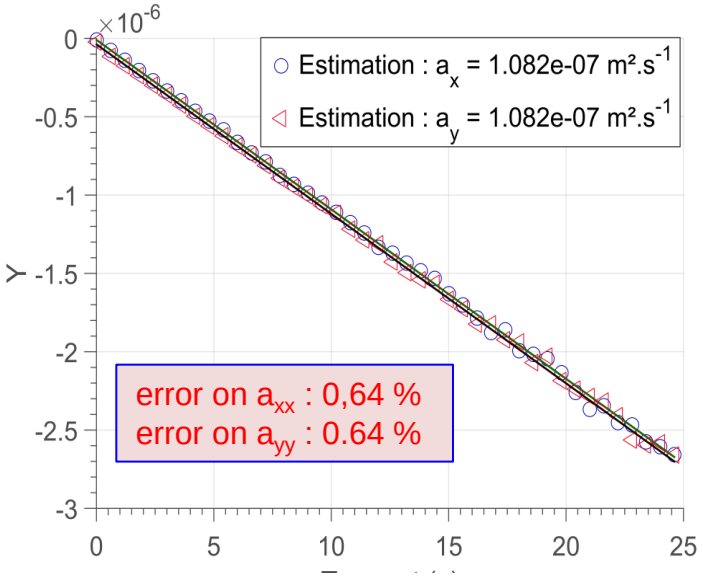
Estimation of thermal diffusivities tensor (axx , ayy)

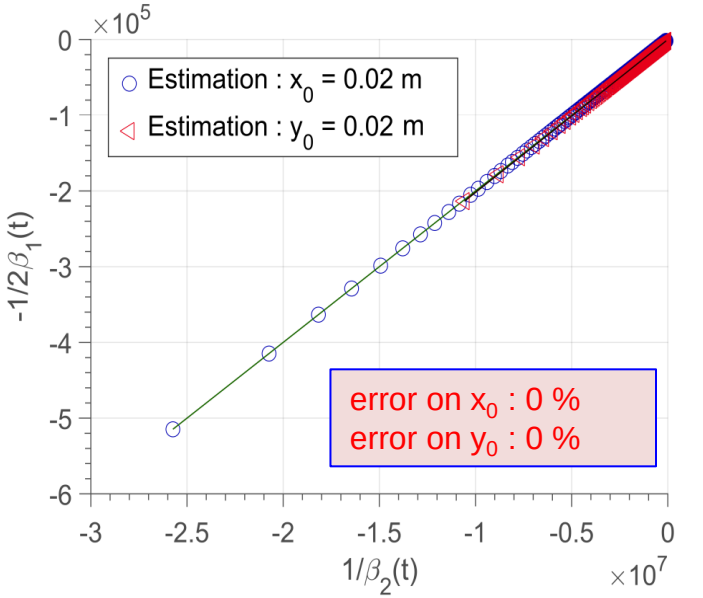
$$-\frac{1}{4\beta_2(t)} = a_{xx}t \quad \text{and} \quad -\frac{1}{4\beta_2(t)} = a_{yy}t$$

Estimation of the laser spot x_0 et y_0 positions

$$\left.\begin{aligned}\beta_1(t) &= \frac{x_0}{2a_{xx}t}\ ou\ \frac{y_0}{2a_{yy}t}\\ \beta_2(t) &= -\frac{1}{4a_{xx}t}\ ou\ -\frac{1}{4a_{yy}t}\end{aligned}\right\} \quad -\frac{1}{2\beta_2(t)} = \frac{x_0}{\beta_1(t)} \ \text{ou} \ -\frac{1}{2\beta_2(t)} = \frac{y_0}{\beta_1(t)}$$

Two parameters estimation:
Laser spot location
Thermal diffusivities tensor



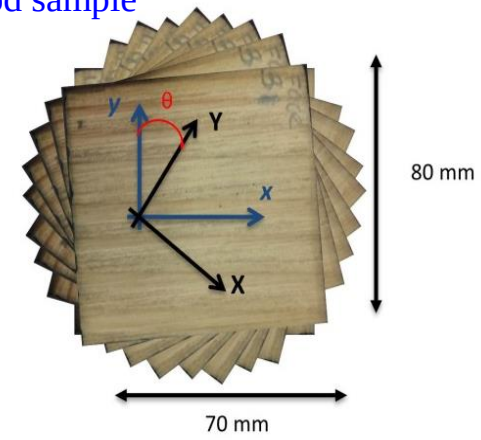


This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

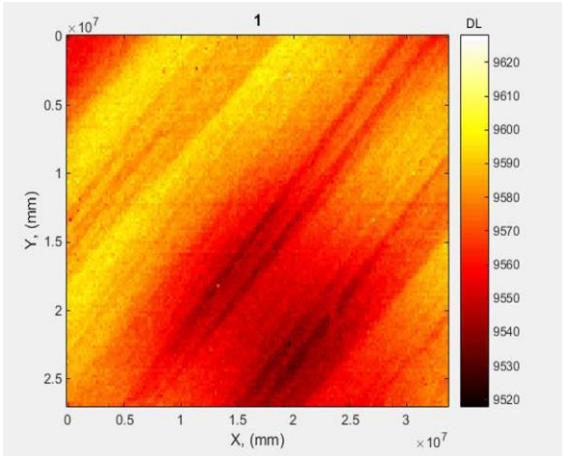
Experimental validation of Pulsed Flying Spot

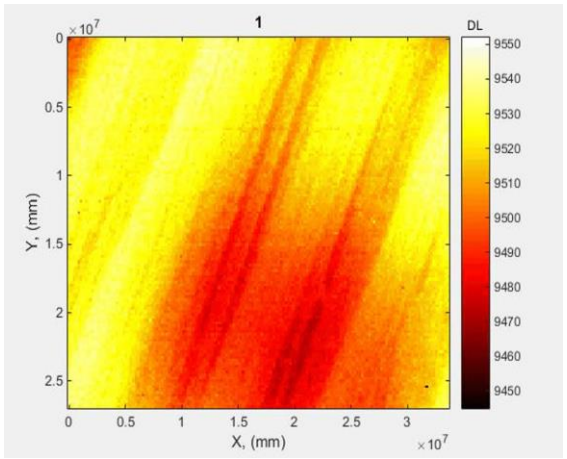
LEM on Oriented Anisotropic Wood Sample

Wood sample

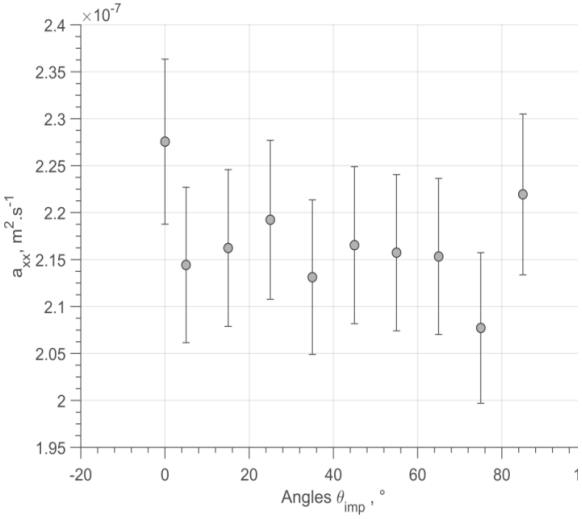


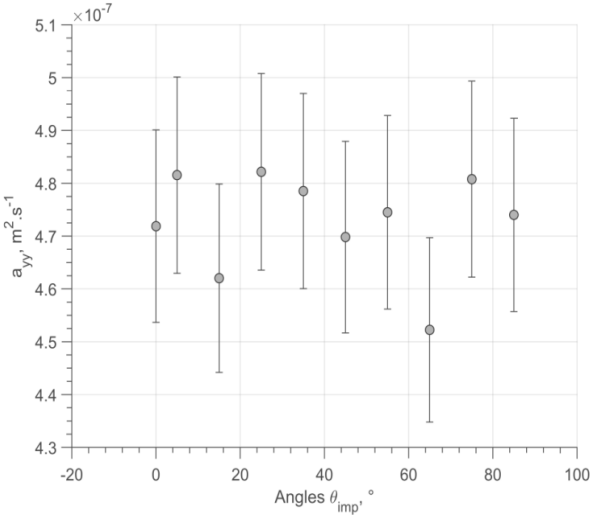
IR measurement as function of the sample angle

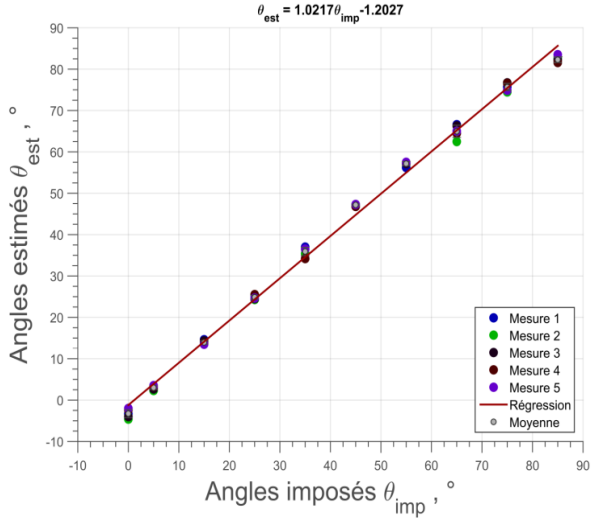




Estimated thermal diffusivities fields along x and y directions and angle







EPSILON ALCEN

17/01/2018

This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

Inverse processing based on Logarithmic Ellipsometric Method

Direct thermal problem

Analytical temperature field out of the main axes [1]

$$T(x,y,z,t)=\frac{Q}{4\pi\rho c_p t}\cdot\left|a^{i,j}\right|^{\frac{1}{2}}\cdot$$

$$exp\left(-\frac{1}{\left|a_{i,j}\right|}\left(\frac{a_{yy}(x-x_0)^2}{4t}-\frac{a_{xy}(x-x_0)(y-y_0)}{2t}+\frac{a_{xx}(y-y_0)^2}{4t}\right)\right)\cdot f_z(t)$$

LEM formulation

$$ln\left(T(x,y,z,t)\right)=\beta_0(t)+\beta_1(t)x+\beta_2(t)y+\beta_3(t)x^2+\beta_4(t)xy+\beta_5(t)y^2$$

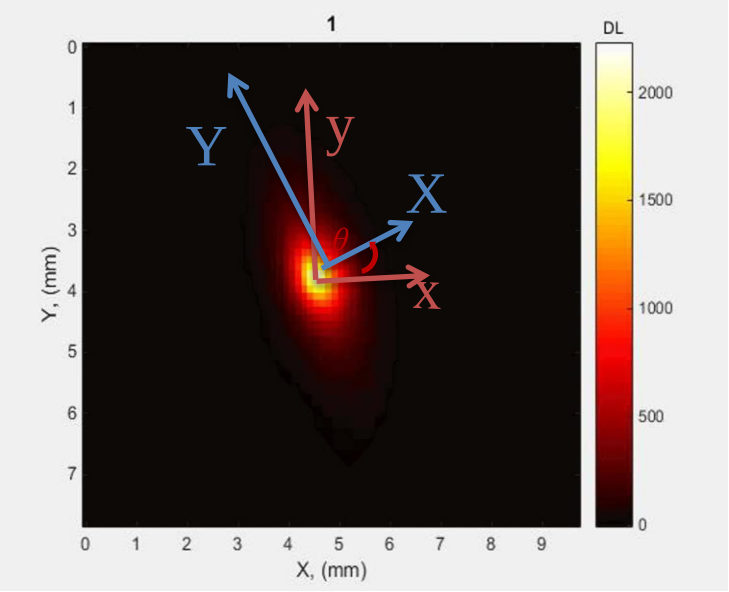
LEM formulation centered on the spot mark

$$ln\left(T(x,y,t)\right)=\beta_3(t)x^2+\beta_4(t)xy+\beta_5(t)y^2$$

Matricial formulation

$$\begin{pmatrix}a_{xx} & a_{xy} & 0\\ a_{yx} & a_{yy} & 0\\ 0 & 0 & a_{zz}\end{pmatrix}=PDP^{-1}=\begin{pmatrix}cos(\theta) & -sin(\theta) & 0\\ sin(\theta) & cos(\theta) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}a_{XX} & 0 & 0\\ 0 & a_{YY} & 0\\ 0 & 0 & a_{ZZ}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}cos(\theta) & sin(\theta) & 0\\ -sin(\theta) & cos(\theta) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

[1] Chang,et al. (1973).



$$a_{xx}=-\frac{1}{4\lambda_1 t}\quad\text{et}\quad a_{yy}=-\frac{1}{4\lambda_2 t}$$

$$\theta=Arctan\left(\frac{x_{21}}{x_{11}}\right)=Arctan\left(-\frac{x_{12}}{x_{22}}\right)$$

Estimation of the thermal diffusivities tensor And the rotation angle between the axes

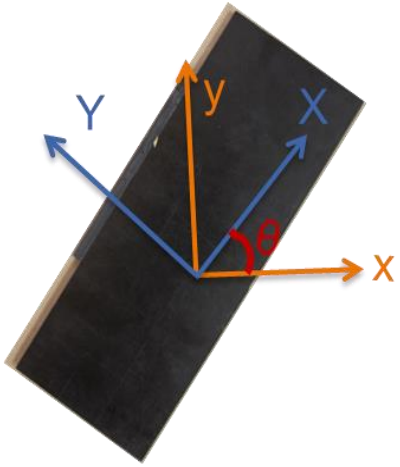
EPSILON ALCEN

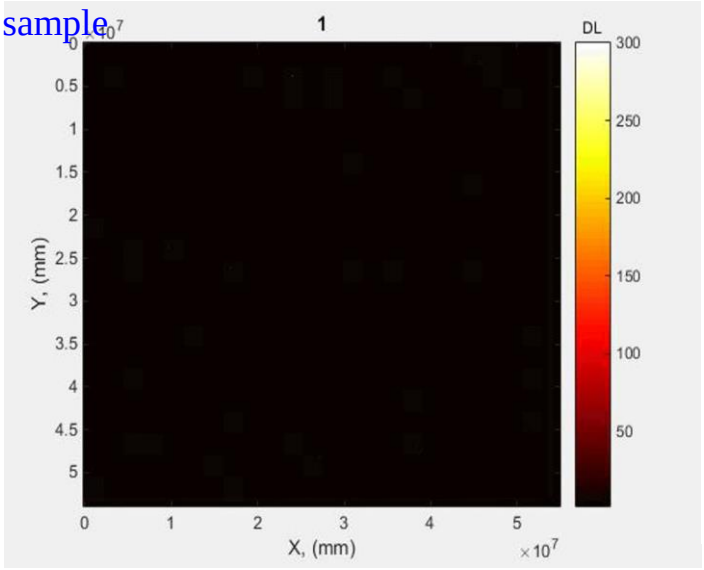
This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

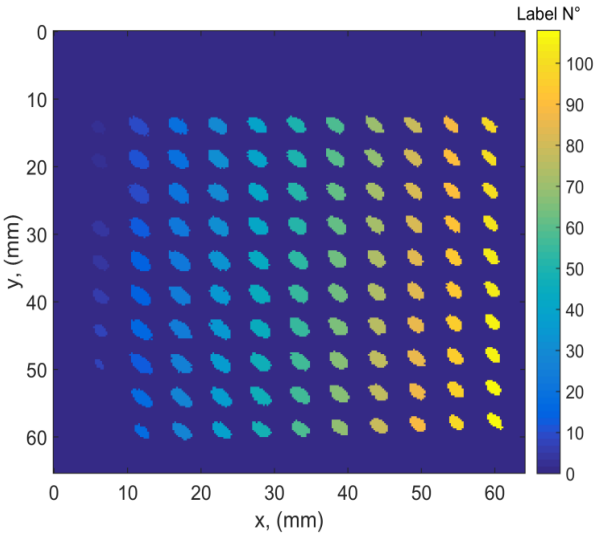
Experimental validation of Grid Pulsed Flying Spot

LEM on Oriented Orthotropic Composite Sample

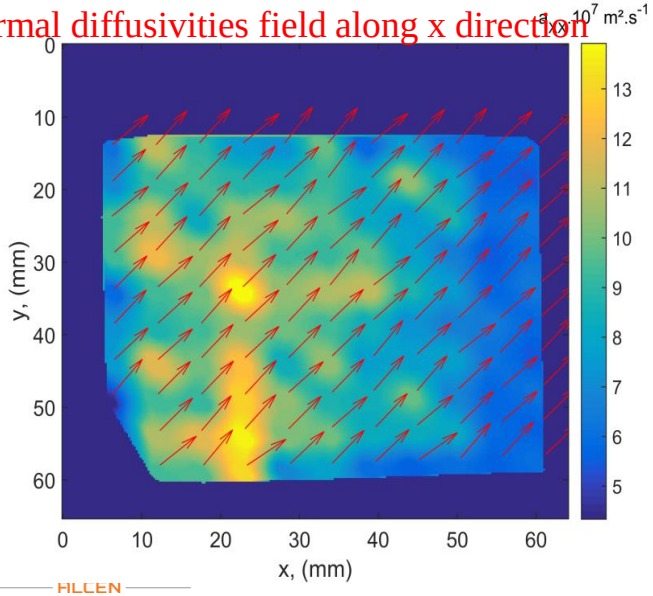
110 laser spots on 1D composite sample



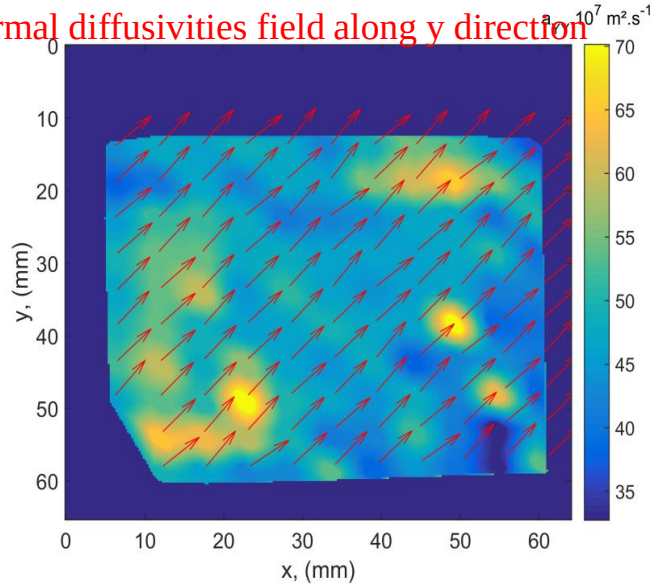




Estimated thermal diffusivities field along x direction



Estimated thermal diffusivities field along y direction



This document and its contents are the exclusive property of EPSILON Ingénierie. They may not be reproduced or disclosed to any third party without prior EPSILON Ingénierie authorization.

I2M BORDEAUX
UMR CNRS 5295

INSTITUT CARNOT ARTS

Mesure in-situ lors de la fusion laser de lit de poudres

Robin KROMER, Maitre de conférences

cnrs dépasser les frontières

université de BORDEAUX

ARTS ET MÉTIERS ParisTech Bordeaux - Talence

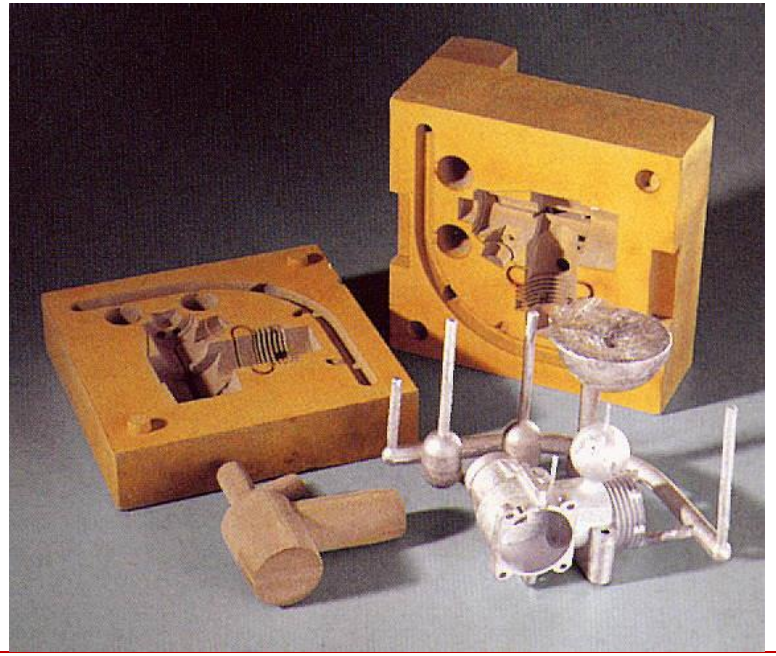
Bordeaux INP AQUITAINE

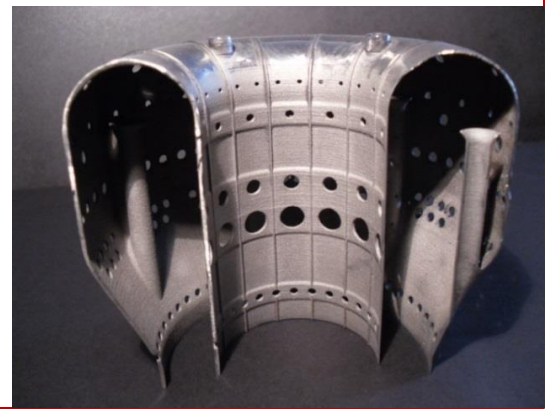
INRA

© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

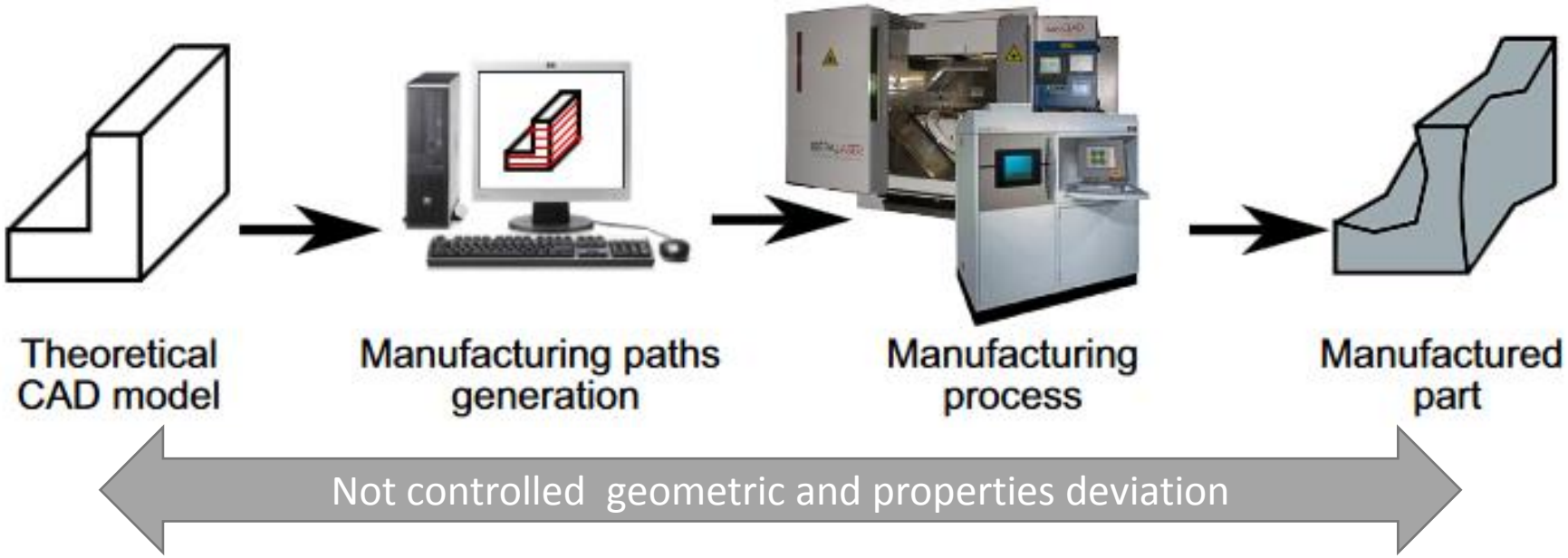
Contexte

« *The right **quantity** of the right **material** at the right **place** and for the good **reason** »*





Contexte



© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

Sommaire

1. Objectif
2. Benchmark
3. Conception
4. Premiers résultats

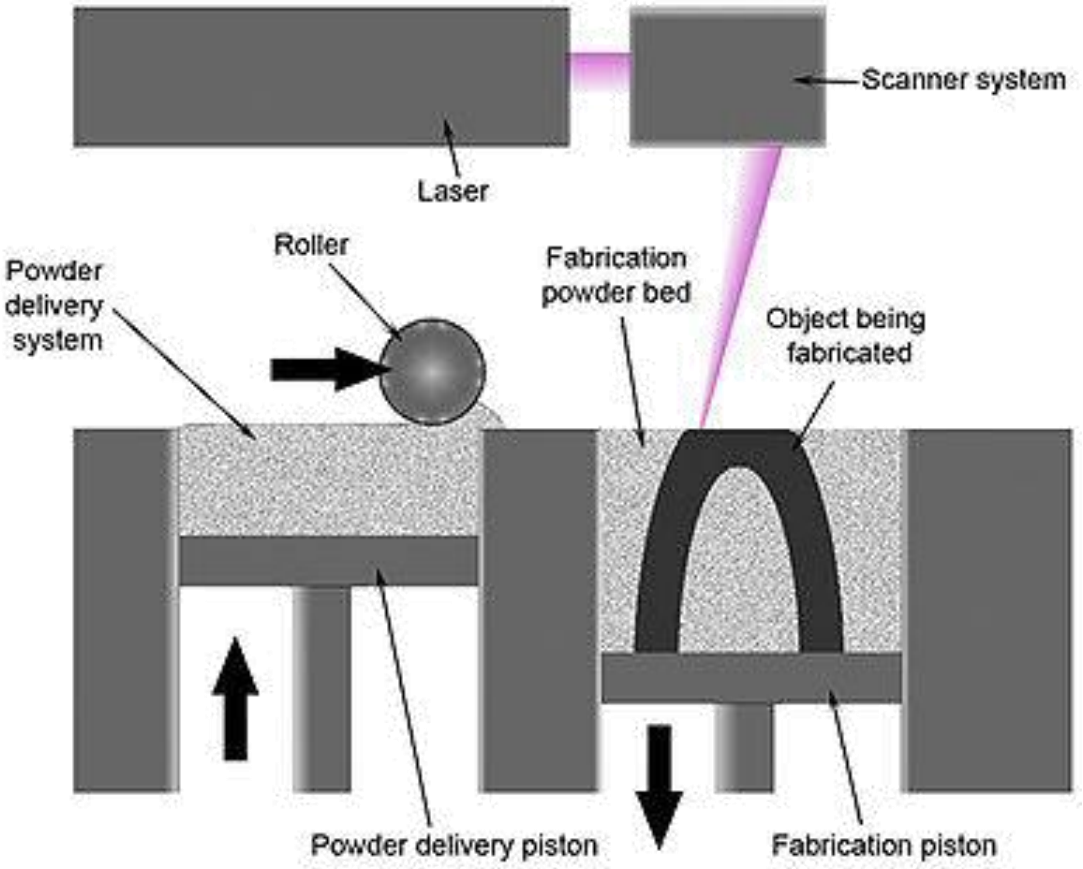
© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

Selective Laser Melting

- Laser de puissance pour la fusion
- Interaction laser-poudre couche par couche
- Juxtaposition des vecteurs suivant une direction dans des patchs (stratégie)
- Chambre de fabrication sous atmosphère inerte et flux laminaire (évacuation des fumées)

- Données:
  - Taille du spot : 60 µm
  - Granulométrie : 20-50 µm
  - Epaisseur : 50 µm



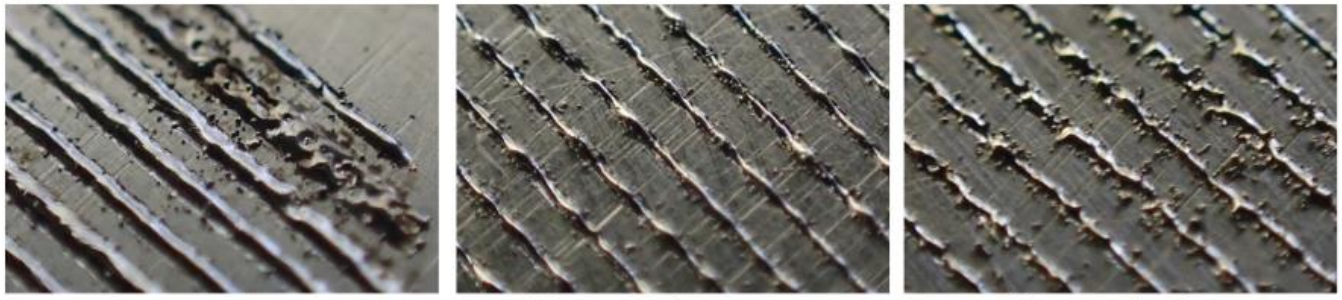
© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

Problématique

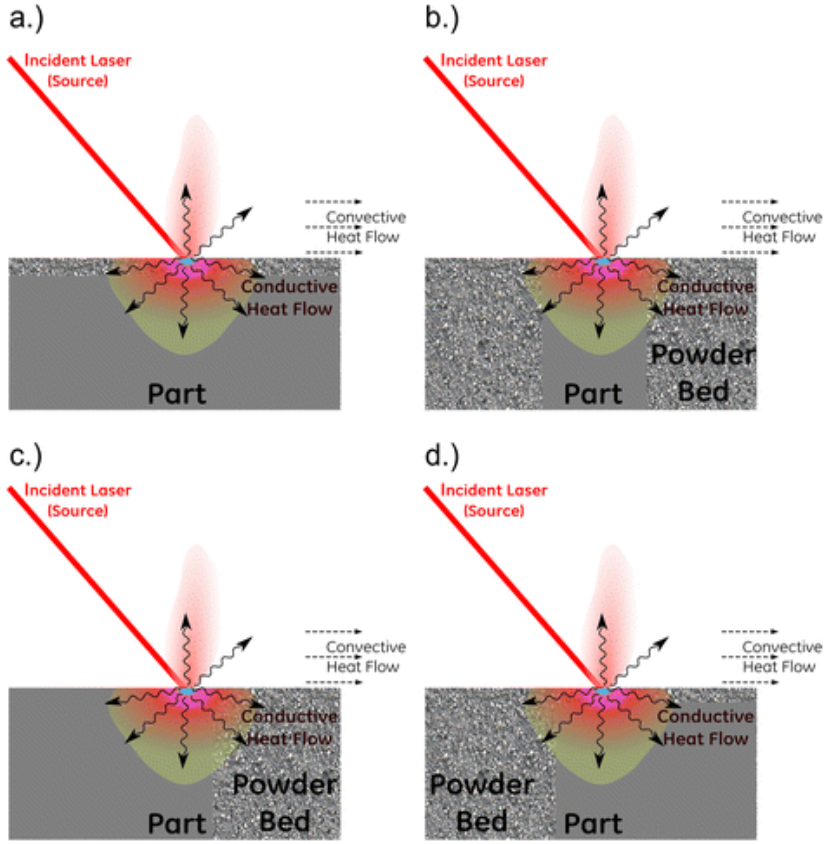
- «The limited stability and repeatability of the process still represent a major barrier for the industrial breakthrough of metal AM systems» (Mani et al., 2015; Tapia and Elwany, 2014; Everton et al., 2016; Spears and Gold, 2016)

1. Instabilité à l'échelle du bain de fusion
2. Effet de la géométrie sur l'énergie à l'échelle locale

→ « Monitoring » robuste pour faire le lien entre les paramètres machines et les propriétés d'une pièce donnée



Jamshidinia et al. 2015



Spears et al. 2016

© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

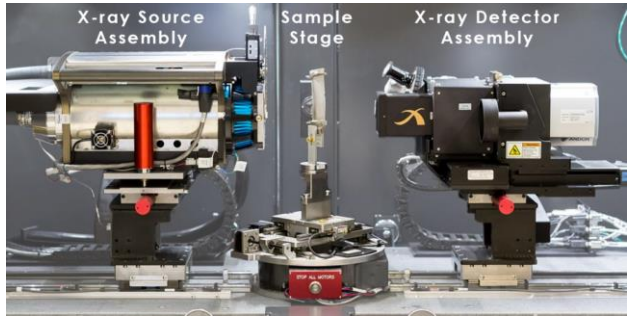
Stratégie

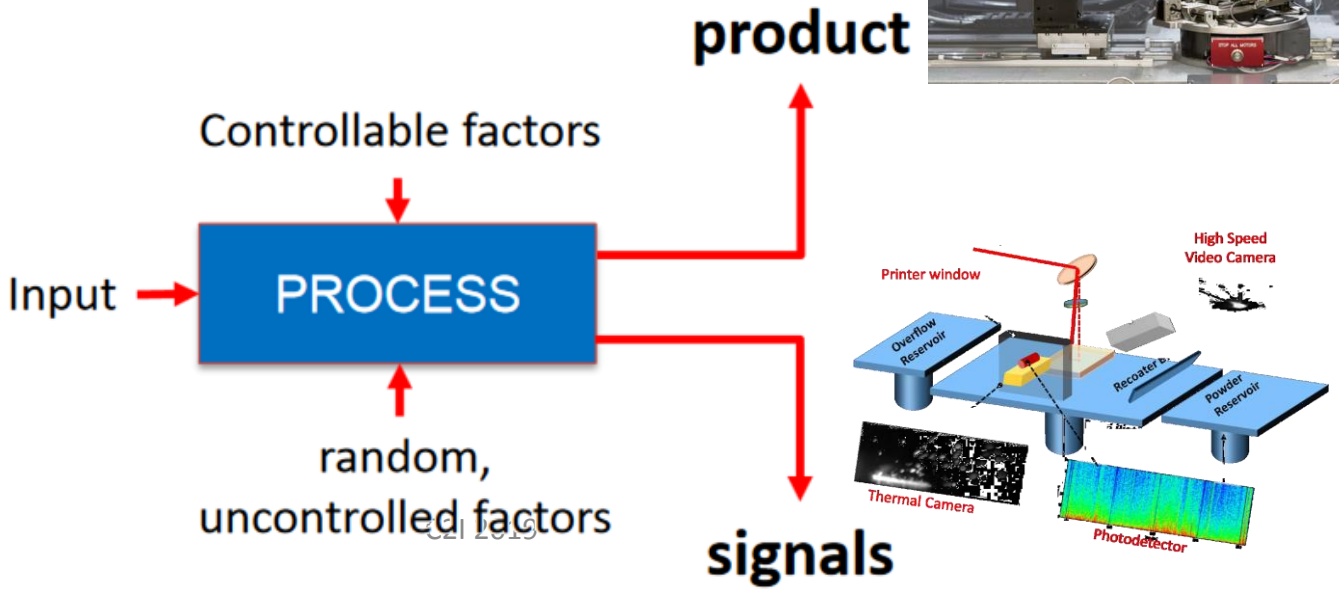
Grasso , M., & Colosimo, B. M. (2017)

High defective rates (> 5 – 30%)

TODAY

TOMORROW

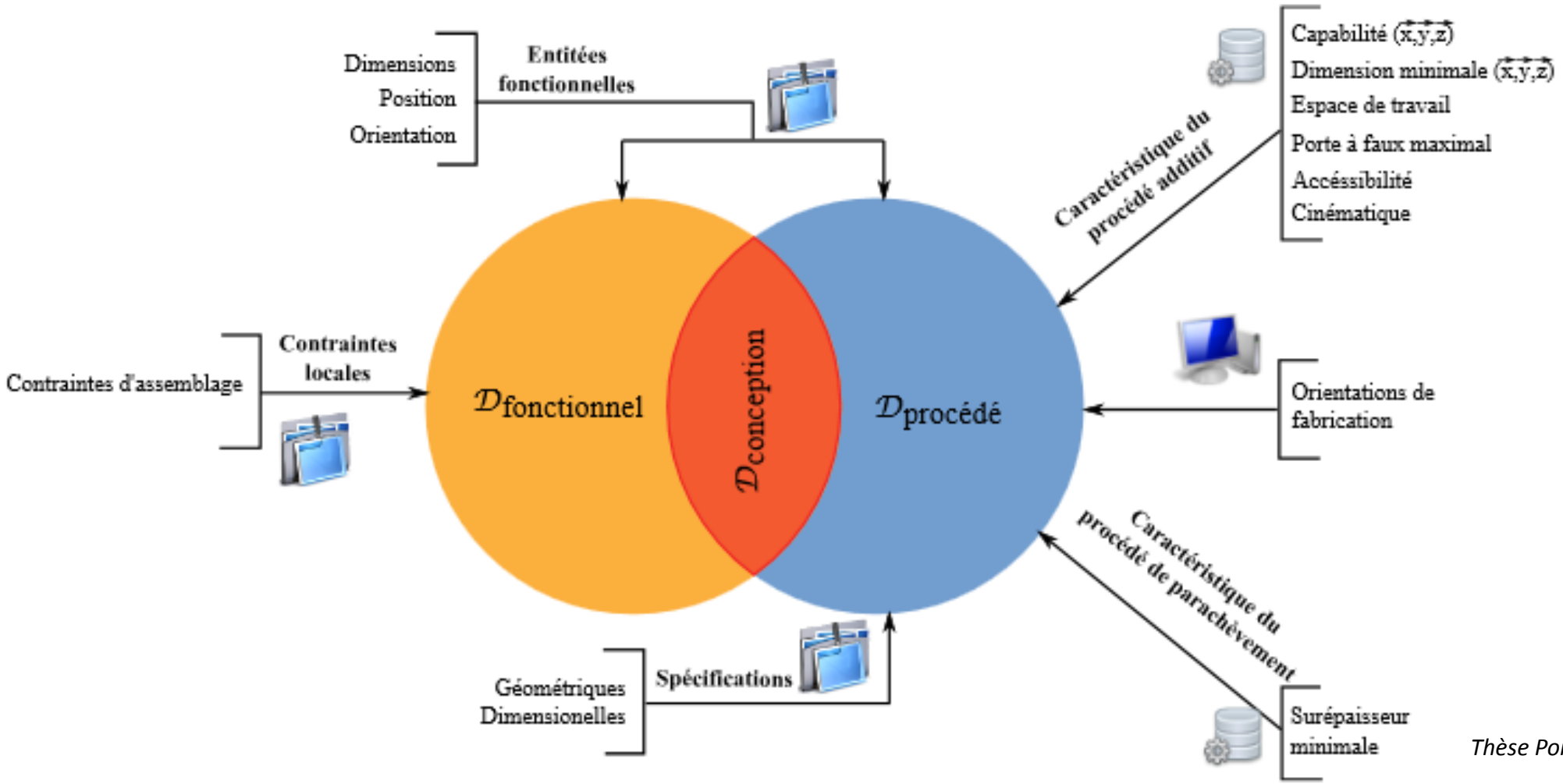




Montazari et al.2017

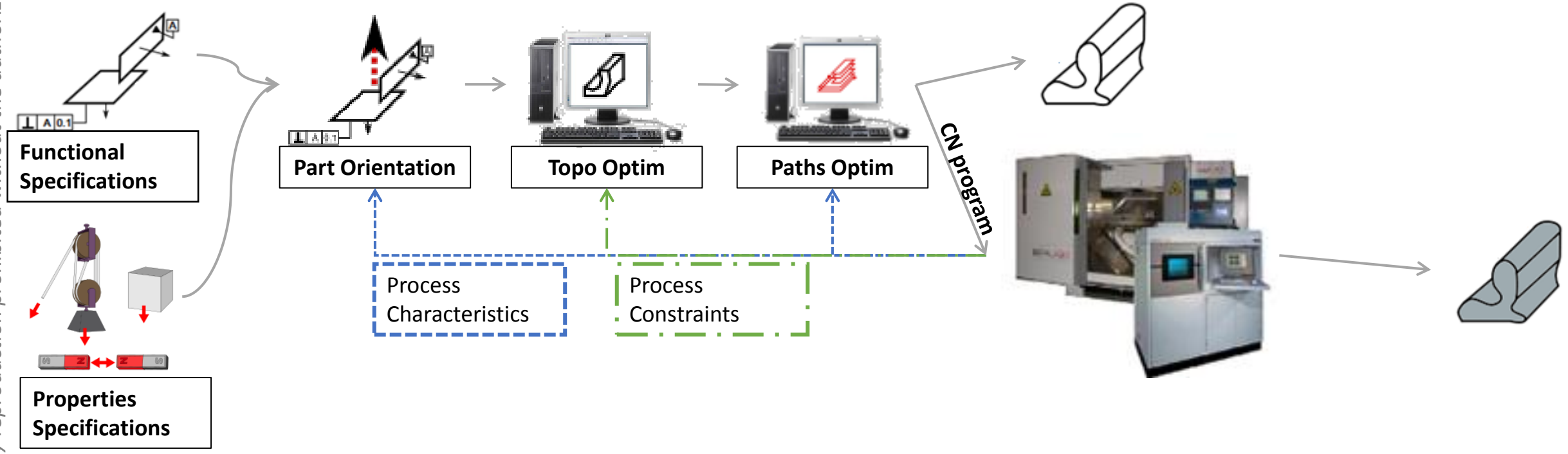
© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

Formalisation des connaissances



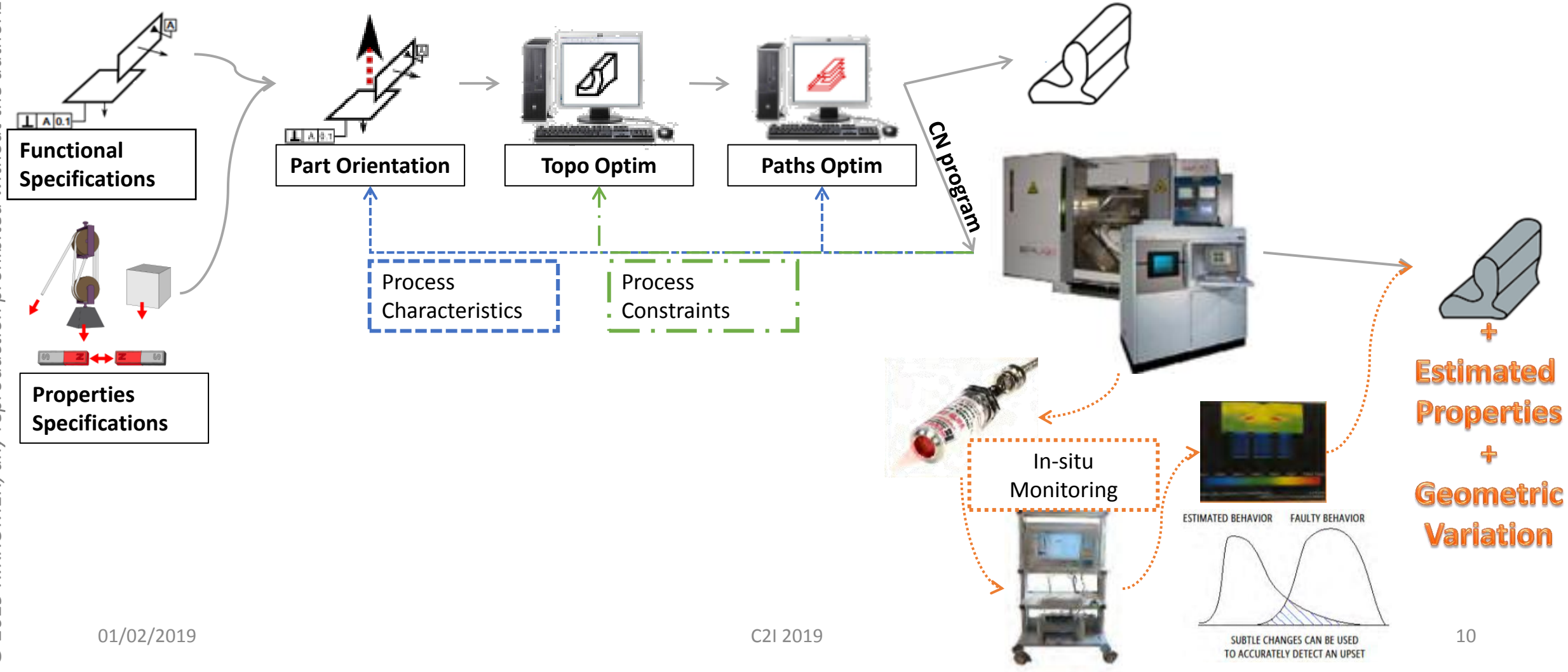
Thèse Ponche 2013

Formalisation des connaissances



© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

Evaluation de la santé matière

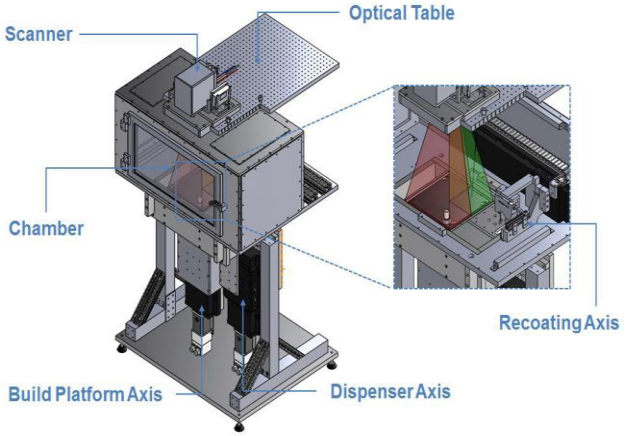


© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

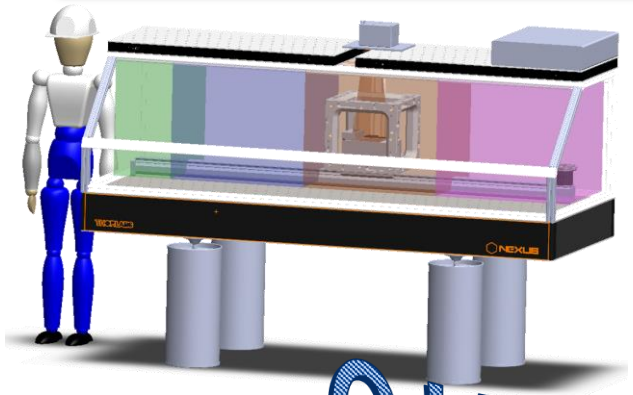
BenchMark

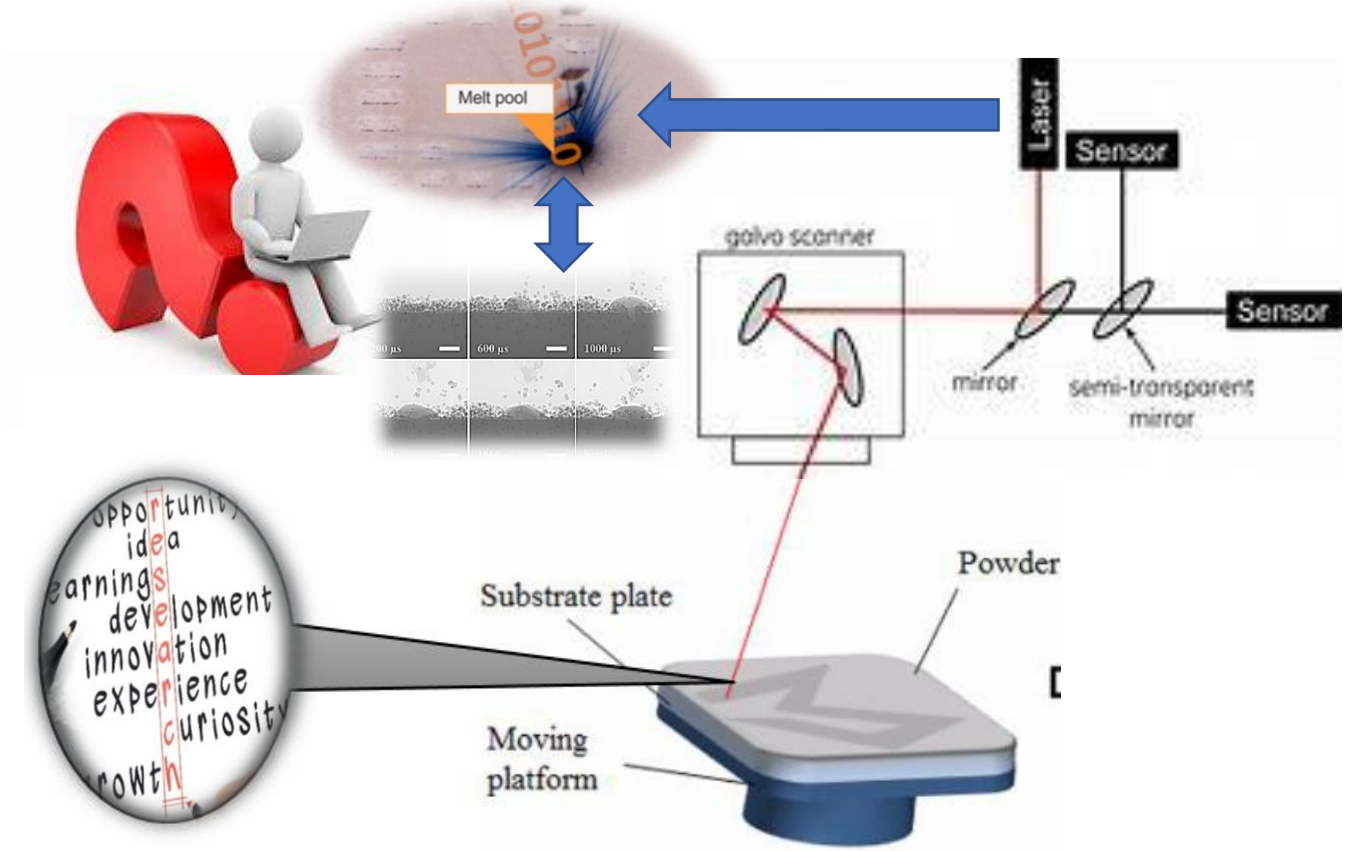
- Edinburgh University: Plateforme pour intégration de source rayon-x
- Fraunhofer ILT: “Monitoring” en temps réel pour le développement d’algorithme prédictif
- EWI : Evaluation des capteurs commerciaux sur différentes identifications de défauts



© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

Banc instrumenté IRT/I2M

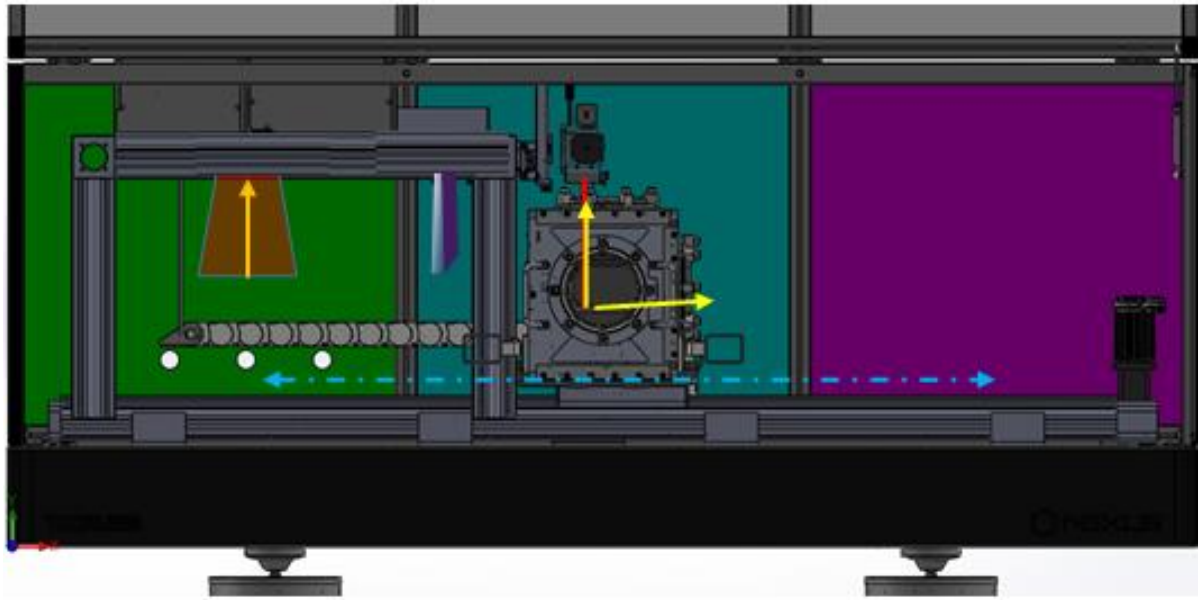


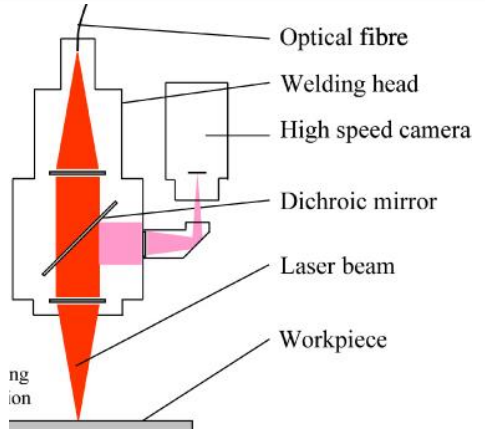


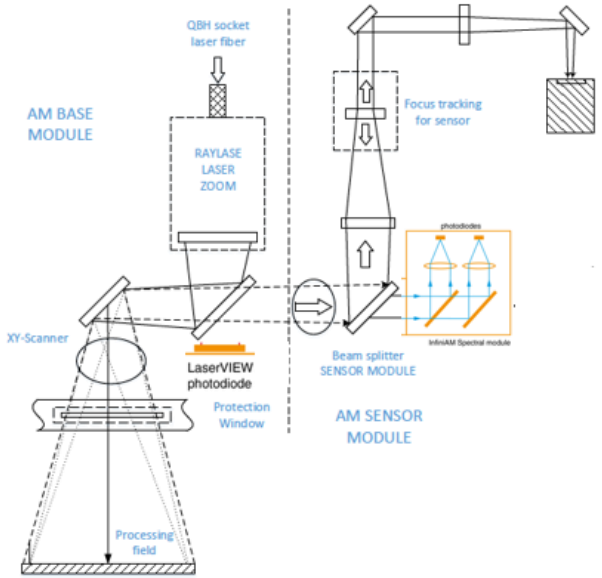
- Visualization
- In-situ monitoring
- Calibration
- Sensor evaluation
- Parameter development
- Research studies
- …

© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

Banc OLLOPA



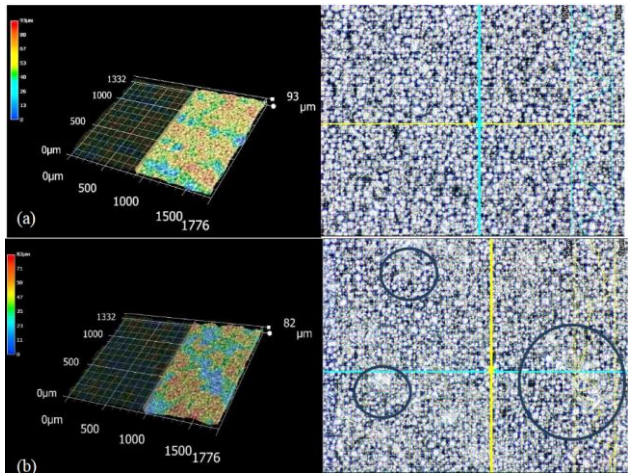


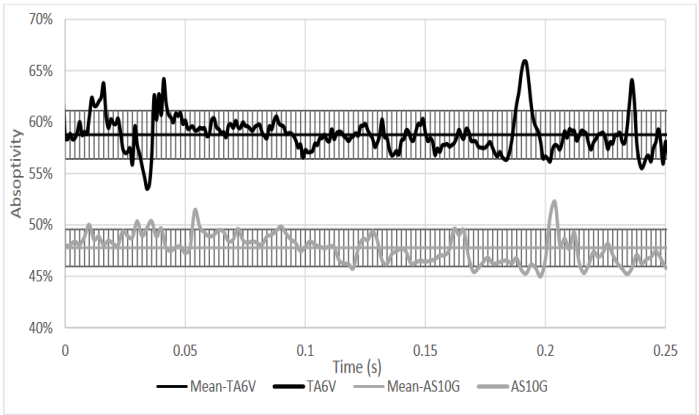


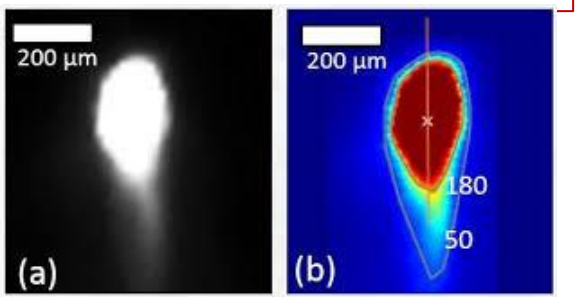
© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

Premiers Résultats

- Pre- et Post-processing : Analyse de la surface en terme de densité et de topographie
  - Evaluation in-situ de la quantité de matière locale
  - Vérification de l'homogénéité
  - Détection de défauts couche par couche
- Analyse in-situ de l'énergie réfléchie dans les longueurs d'onde visible
  - Signature de zone de manque de fusion ou sur-fusion
  - Mesure du bain et des fluctuations







Kromer et al. 2019

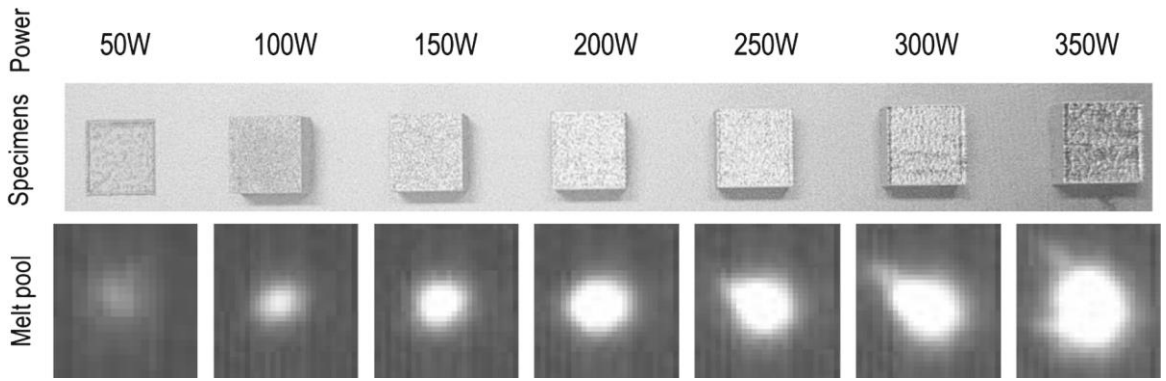
© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

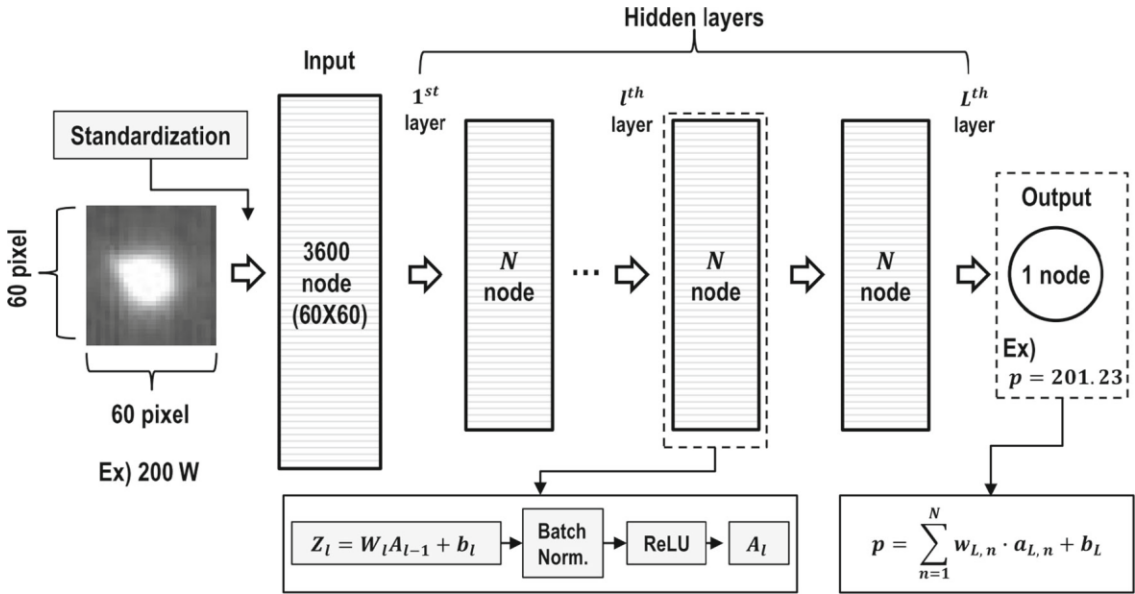
Perspectives

Beaucoup de données bientôt disponibles…

MAIS comment utiliser ces données et formaliser nos connaissances ?

→Classements et fonctions de transfert + simulation numérique (DEM, FEM, FVM)



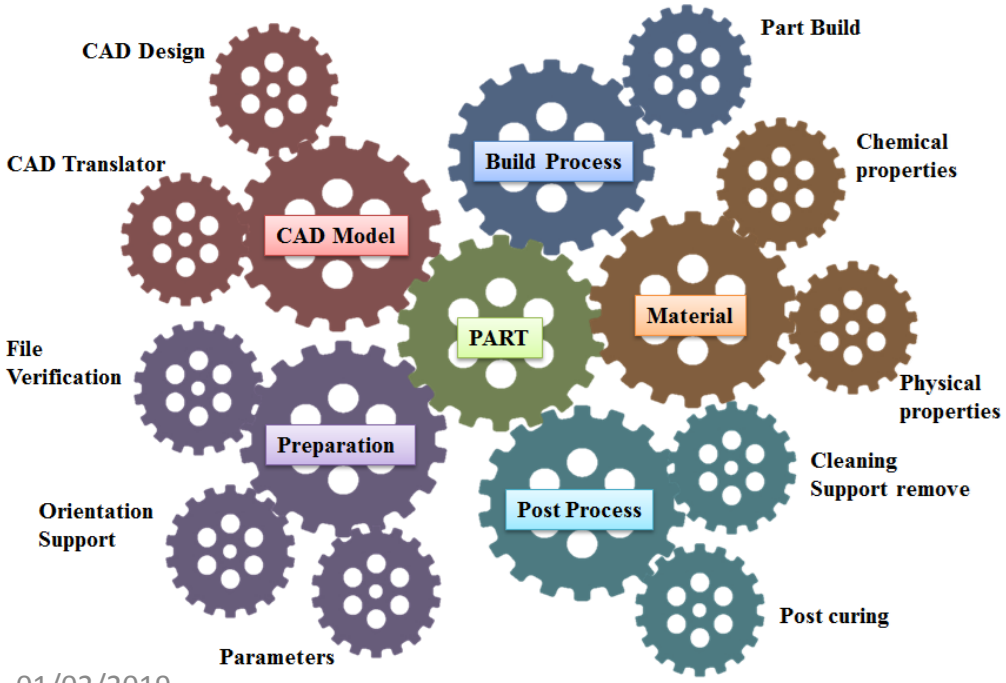


© 2019 R.KROMER, any reproduction prohibited without the authorization of the author.

Conclusion

1. Compréhension des phénomènes physiques
2. Formalisation des connaissances
3. Fonctions de transferts

→ Evaluation de la santé matière (voir machine learning)



I2M BORDEAUX
UMR CNRS 5295

INSTITUT CARNOT ARTS

Merci !

Robin KROMER, Maitre de conférences

cnrs dépasser les frontières

université de BORDEAUX

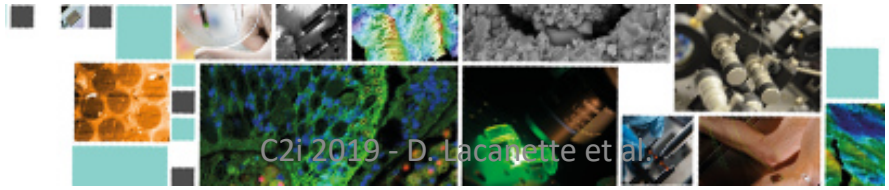
Bordeaux - Talence ARTS ET MÉTIERS ParisTech

Bordeaux INP AQUITAINE

INRA

Métrologie d'un site expérimental souterrain en domaine karstique

Lacanette Delphine, Malaurent Philippe, Portais Jean-Christophe, Naessens Fabien, Ferrier Catherine, Bassel Léna, Konik Stéphane, Bousquet Bruno, Chapoulie Rémy



INTRODUCTION

Grottes : sites naturels difficiles à instrumenter

température stables toute l'année => précision de l'ordre du centième

humidité avoisinant les 100% => conditions difficiles pour le matériel

exiguïté des sites => acheminement complexe, développement de matériel portable

Objectif

Approfondir la connaissance des climats internes pour améliorer les conditions de conservation des grottes ornées

N. Aujoulat

LA GROTTE LABORATOIRE DE LEYE

Grotte située en Dordogne, commune de Marquay, dans la vallée de la Vézère

Dépourvue d'intérêt archéologique mais localisée dans une zone à forte concentration en grottes ornées

Sélection suite à une prospection pour assurer sa représentativité par rapport au corpus des grottes ornées

Morphologie typique des réseaux karstiques de cette région

Equipe pluridisciplinaire

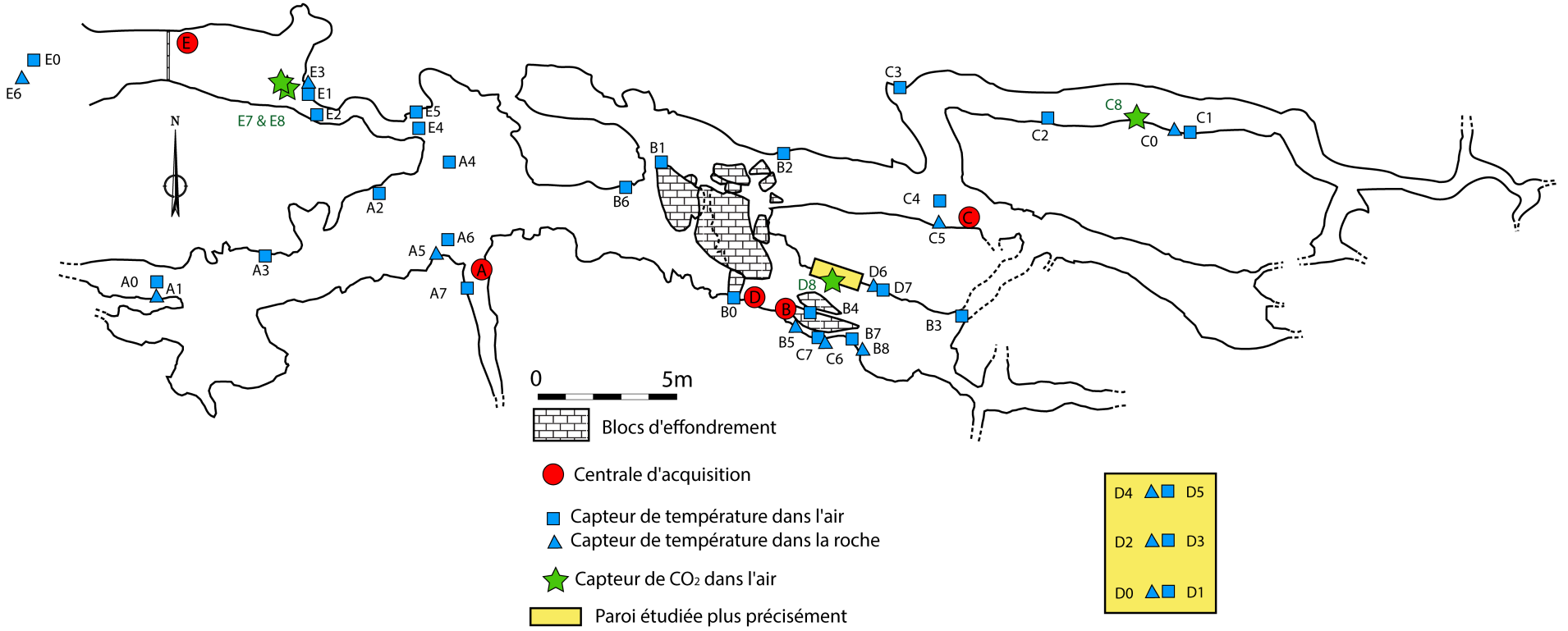
Gestion actuelle par un comité de pilotage :
Catherine Ferrier, Stéphane Konik, Delphine Lacanette

Convention avec le propriétaire

Localisation de la grotte de Leye

INSTRUMENTATION DE LA GROTTE DE LEYE

Installation progressive depuis 2011



Carte d'instrumentation de la grotte de Leye

MATÉRIEL

Capteurs de température :

Pt100 avec des connecteurs de résolution de 0,001°C
=> précision de 0,01°C

Capteurs de CO_2 :
Vaisala Carbocap GMT220

Centrales d'acquisition 9 voies, type ALMEMO 2890

Positionnement de capteurs de température air/roche et d'un capteur de CO_2

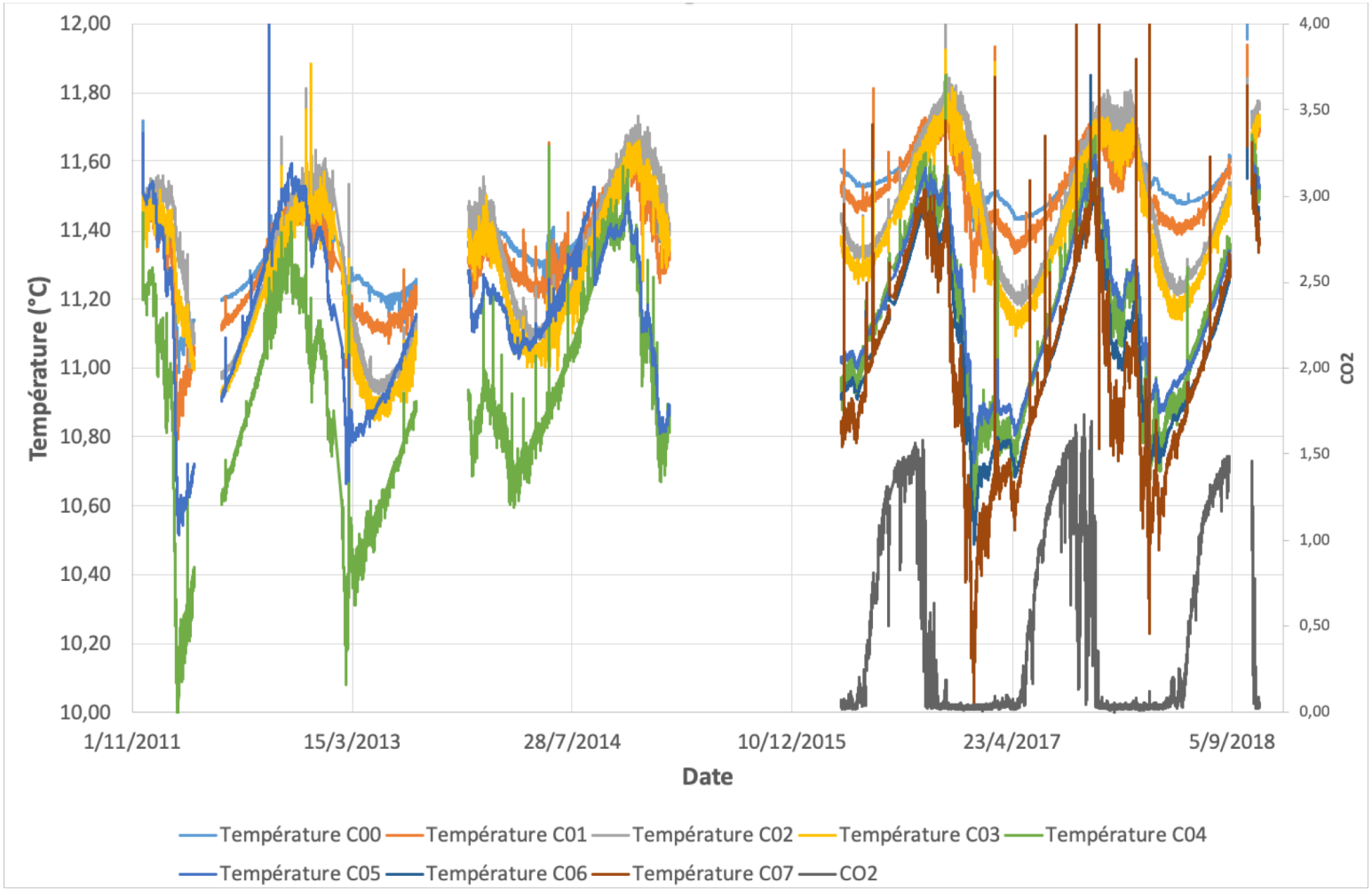
COMPRÉHENSION DU FONCTIONNEMENT CLIMATIQUE GLOBAL

Large communication avec l'extérieur

via le massif (entre 4 et 12m de la surface)

via l'entrée (0,6 m^2 pour la section la plus étroite)

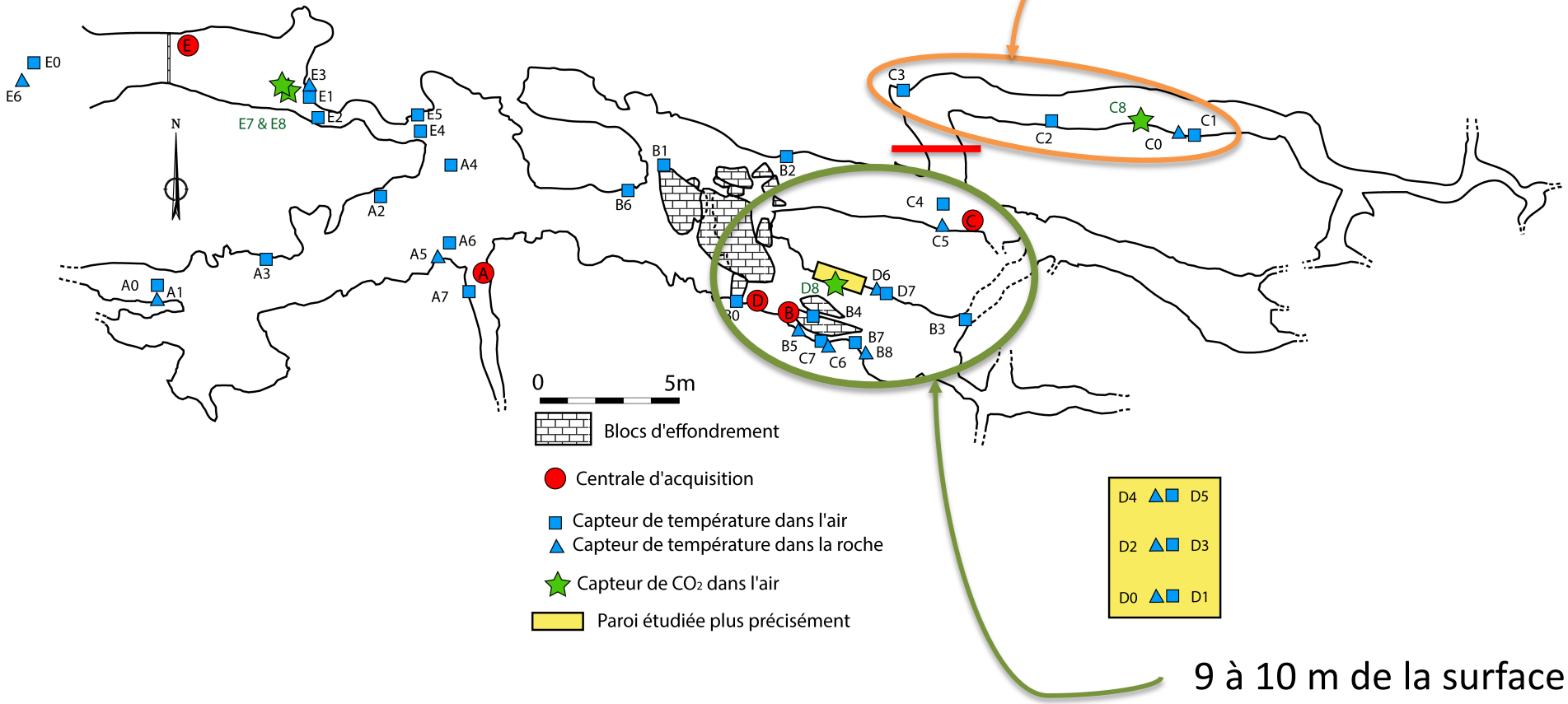
Piège à air froid



COMPRÉHENSION DU FONCTIONNEMENT CLIMATIQUE GLOBAL

Déphasage entre les 2 zones (1,5 mois)

11 à 12 m de la surface



9 à 10 m de la surface

=> Variation annuelle directement liée à l'épaisseur d'épikarst

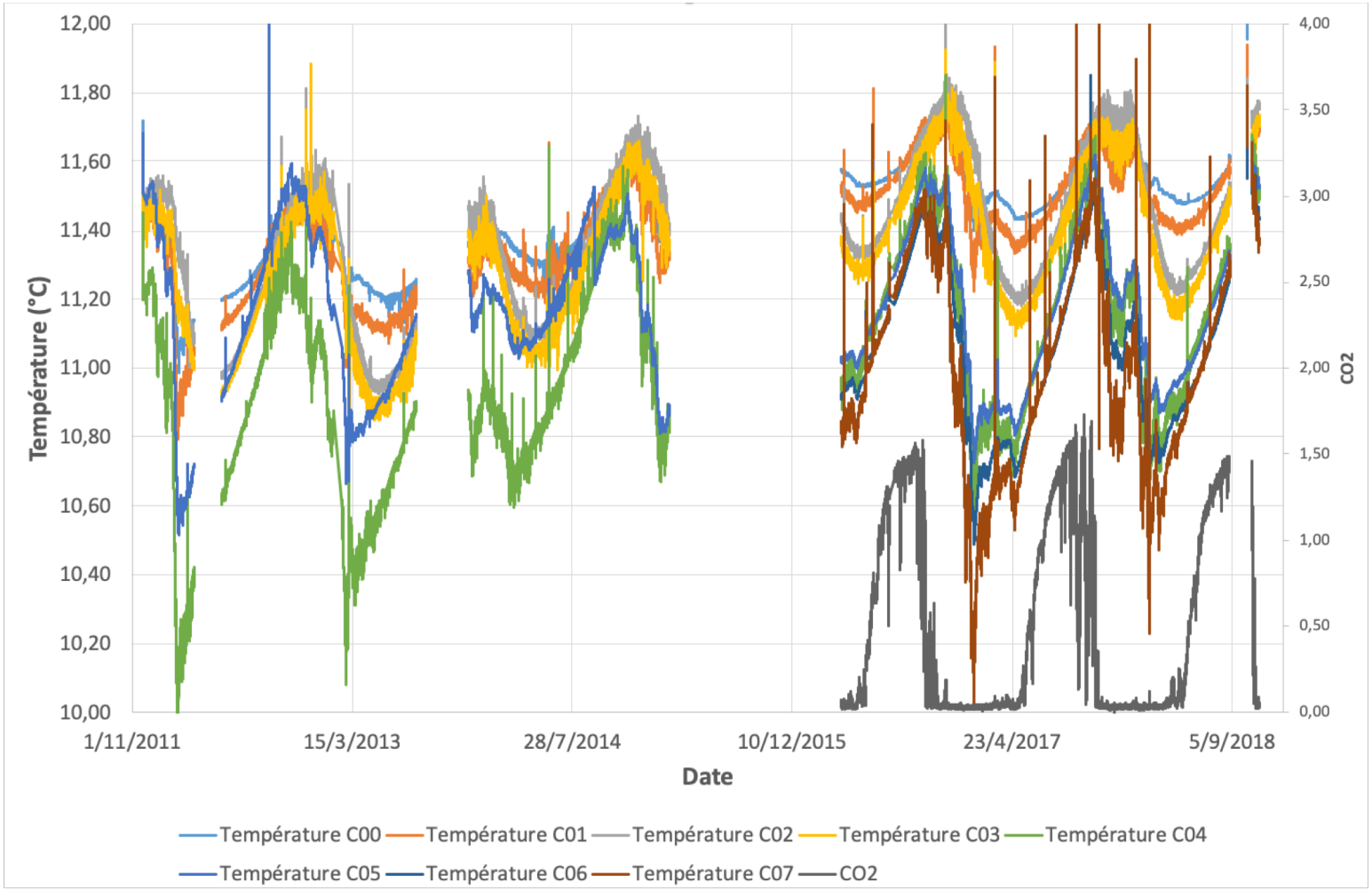
COMPRÉHENSION DU FONCTIONNEMENT CLIMATIQUE GLOBAL

Large communication avec l'extérieur

via le massif (entre 4 et 12m de la surface)

via l'entrée (0,6 m^2 pour la section la plus étroite)

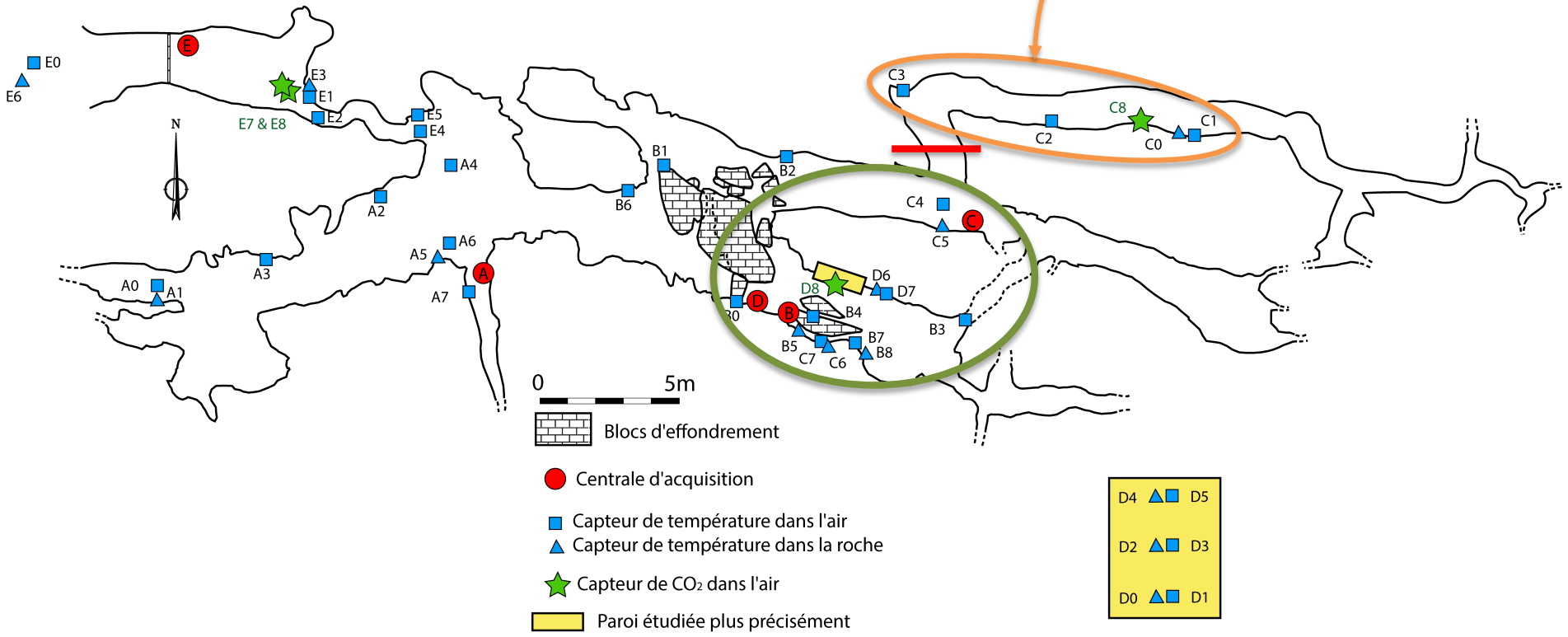
Piège à air froid



COMPRÉHENSION DU FONCTIONNEMENT CLIMATIQUE GLOBAL

Différence d'amplitude entre les 2 zones (0,1 à 0,2°C)

Zone moins sensible aux épisodes très froids

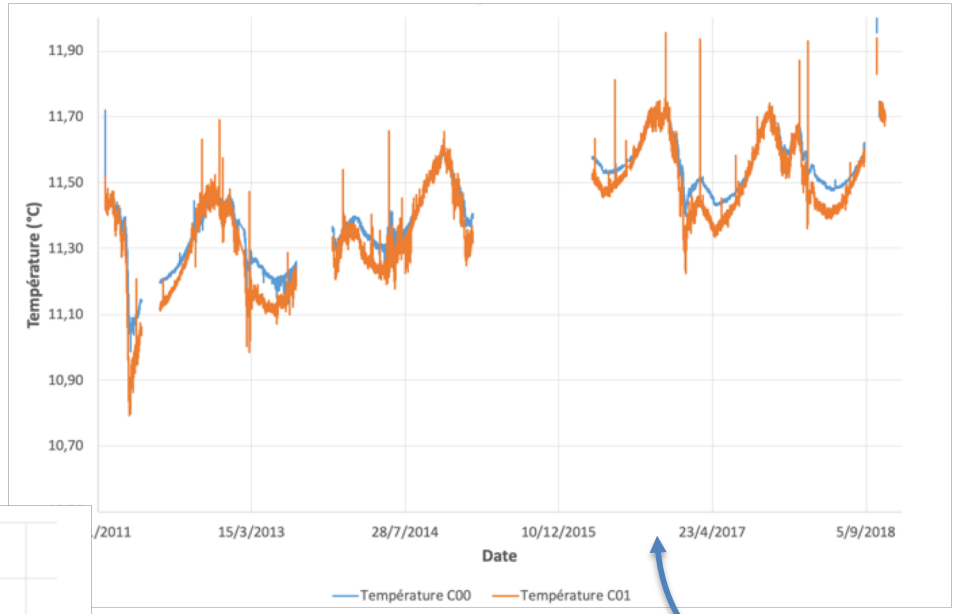


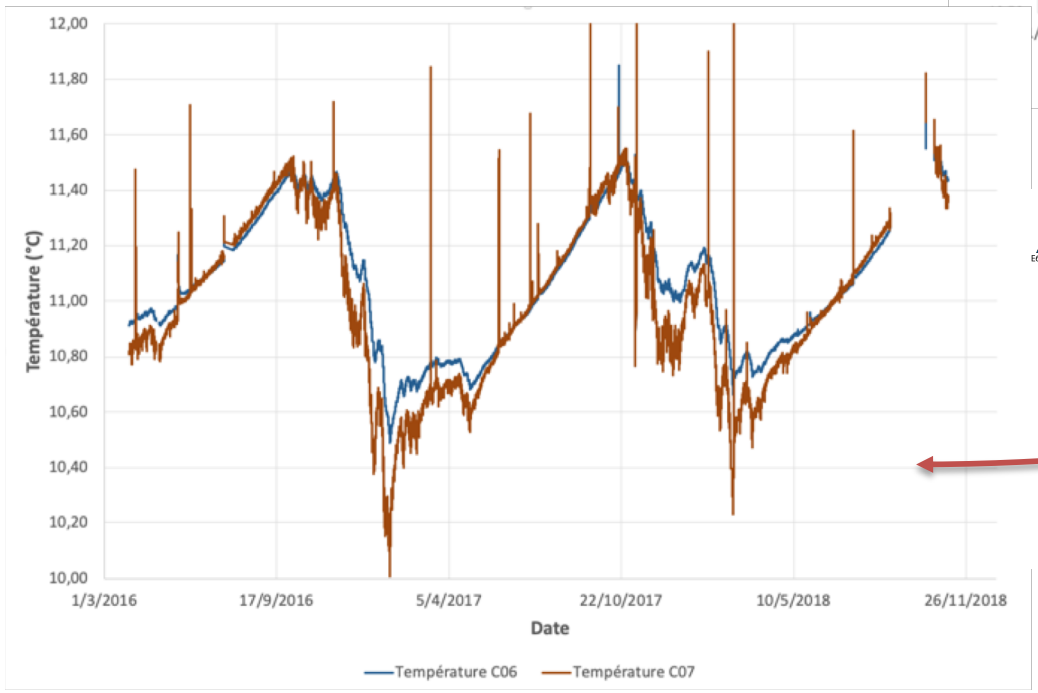
=> Proximités différentielles par rapport à l'entrée

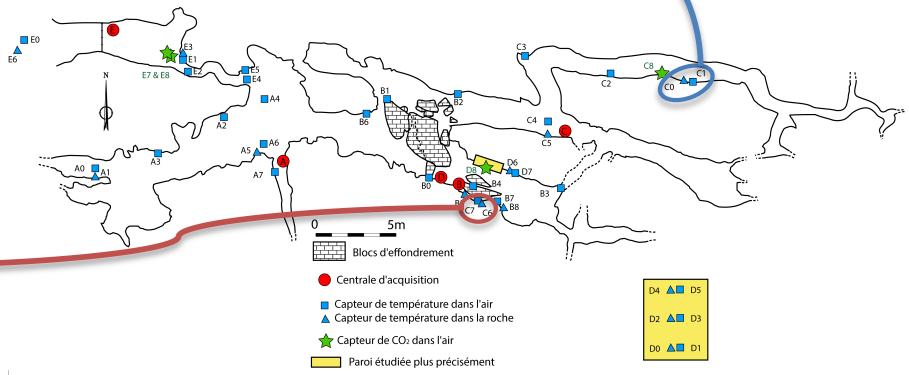
EXEMPLE D'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES AIR/ROCHE

Conditions propices ou non à la condensation

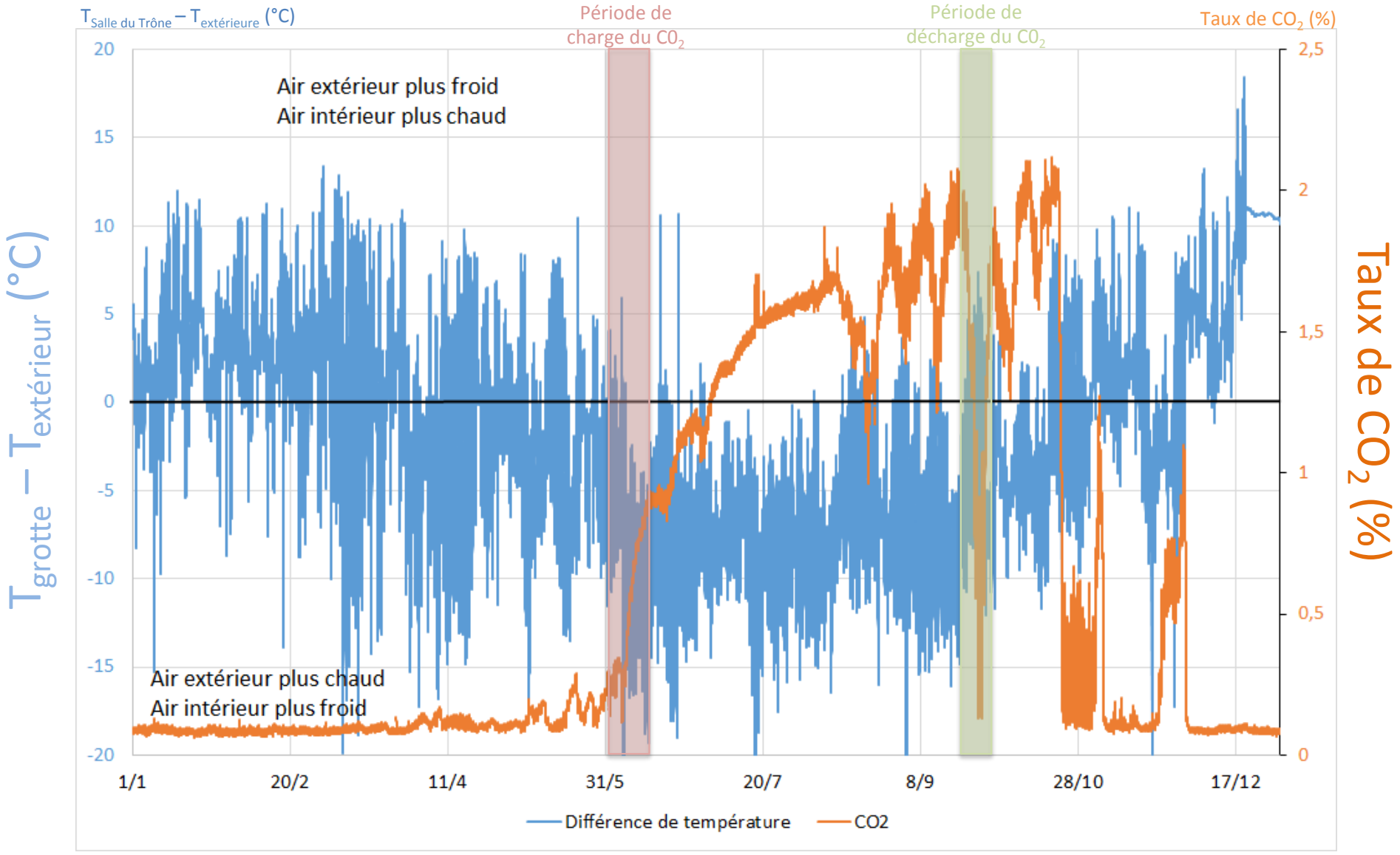
Echanges entre air et roche







RENOUVELLEMENT DE L'AIR EN FONCTION DES SAISONS

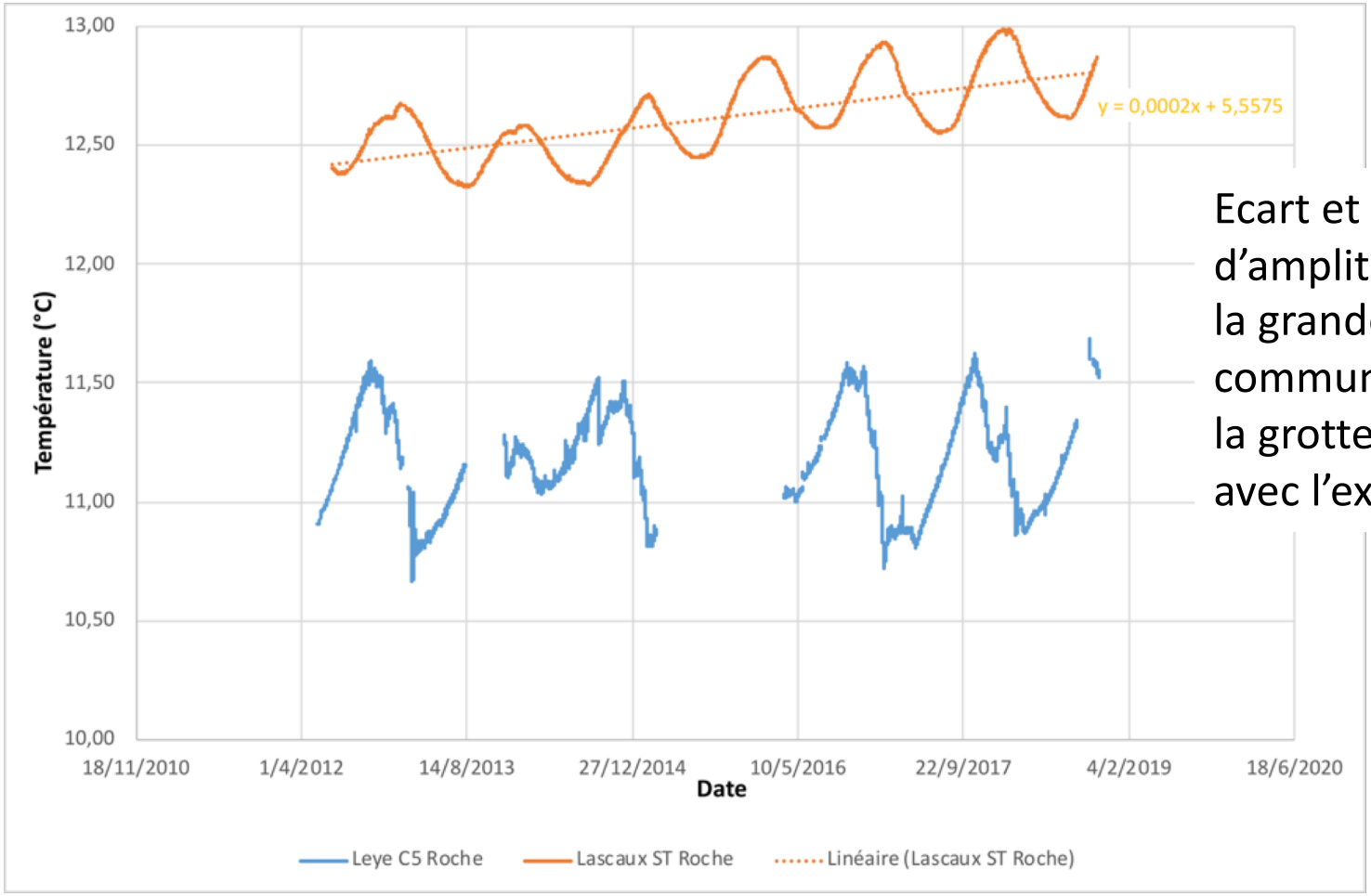


Variation de la température et du taux de CO_2 dans la Salle du Trône en 2014

C2i 2019 - D. Lacanette et al.

COMPARAISON AVEC L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DANS LASCAUX

Comportement similaire, déphasage lié à la différence de profondeur



Ecart et différence d'amplitude liés à la grande communication de la grotte de Leye avec l'extérieur

Comparaison des évolutions des températures de roche dans la grotte de Leye et dans la grotte de Lascaux entre 2012 et 2018

CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

La grotte de Leye = site d'observation sur le temps long, nécessité de suivre son climat

La grande sensibilité des capteurs permet l'étude des variations fines de la température et du CO_2 pouvant être à l'origine des phénomènes de modification de l'état de surface des parois, cause d'une éventuelle altération des œuvres pariétales

N. Aujoulat © MCC/Centre National de Préhistoire

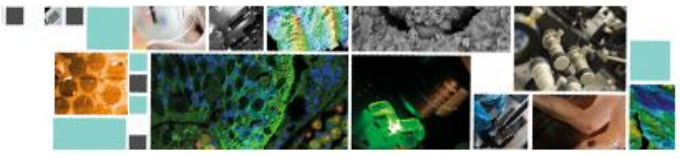
Lascaux
Vestige d'une représentation de cheval

C. Ferrier

Rouffignac
Frise des dix mammouths

Conception d'un système de mesure de la consommation électrique d'une habitation pour le suivi et l'identification de charges résidentielles

S. Houidi, F. Auger, P. Frétaud, D. Fourer, L. Miègeville, H. Ben Attia



C2i 2019: 8ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation
28-30 janv. Talence (France)

Sommaire

1 Introduction
- Contexte et problématique
- Non Intrusive Load Monitoring

2 État de l'art des technologies pour les mesures de consommation résidentielle
- Caractéristiques des applications industrielles commercialisées
- Cahier des charges du prototype développé

3 Architecture du système d'acquisition
- Synoptique général
- Conditionnement du courant
- Conditionnement de la tension
- Échantillonnage et stockage des données

4 Résultats expérimentaux

5 Conclusions et perspectives
- Conclusions
- Perspectives

1 Introduction
- Contexte et problématique
- Non Intrusive Load Monitoring

2 État de l'art des technologies pour les mesures de consommation résidentielle

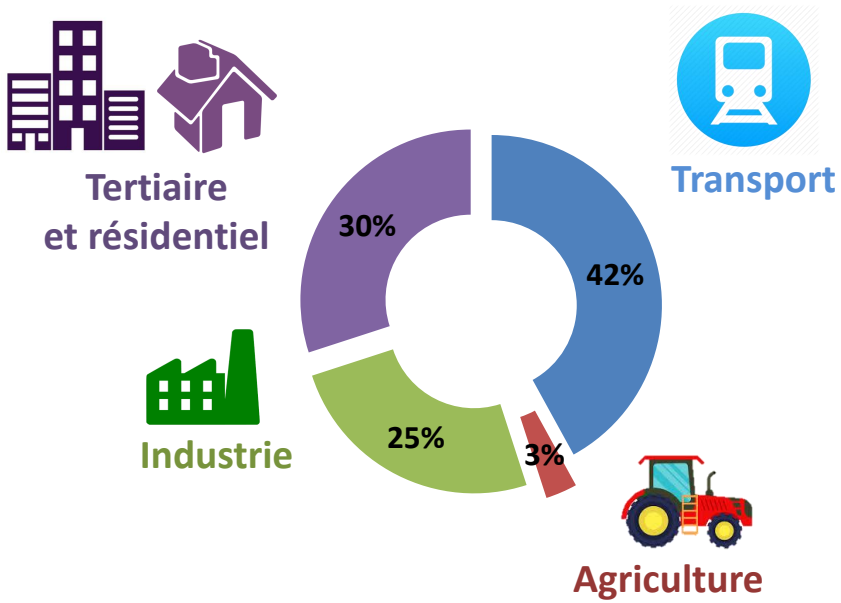
3 Architecture du système d'acquisition

4 Résultats expérimentaux

5 Conclusions et perspectives

Contexte

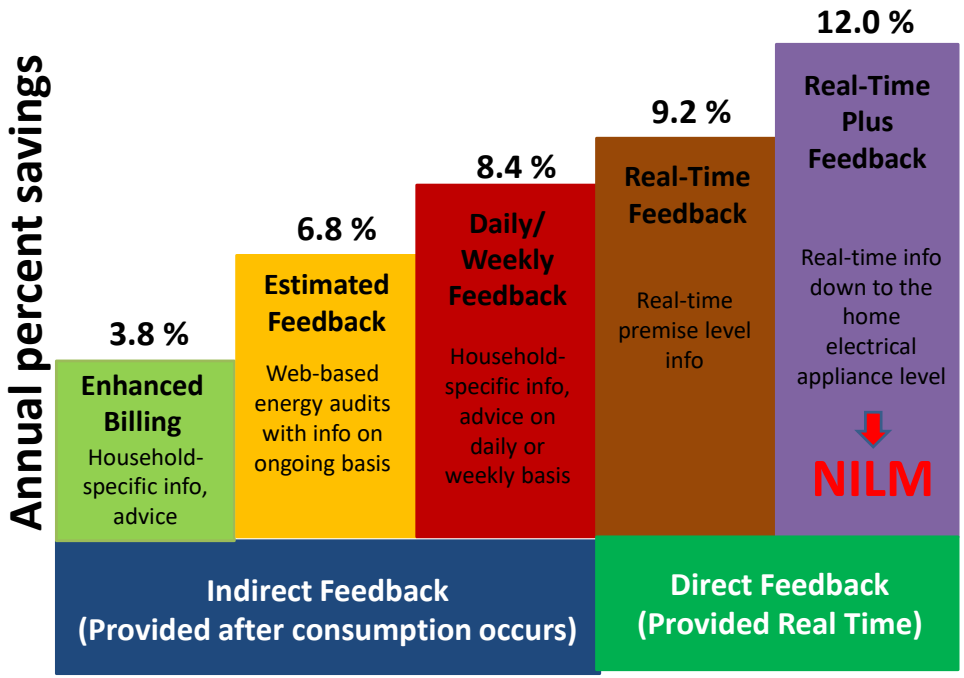
- Contribution du secteur résidentiel à près de 30% de la consommation finale d'électricité en France.
- Augmentation démographique
- Augmentation du nombre d'appareils électroménagers et grande diversité



Source: Ministère de l'énergie, de l'environnement et de la mer: Service de l'observation et des statistiques-chiffres clés de l'énergie 2015 publiés en 2017

Solution

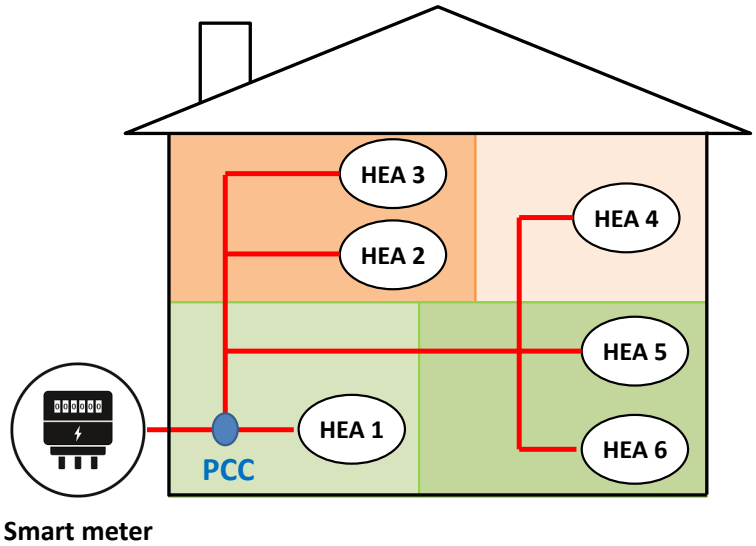
- Suivi de la consommation de chaque charge électrique résidentielle et retour d'information en temps réel au consommateur (*"direct feedback"*)

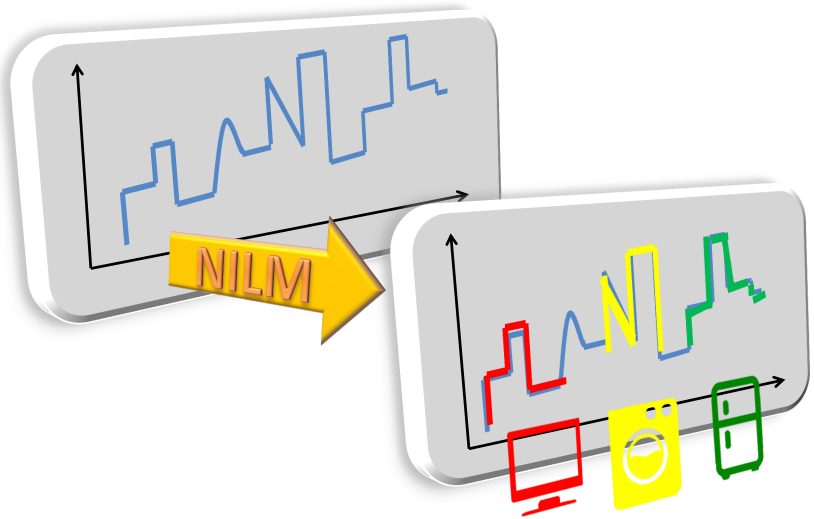


Source: American Council for an Energy Efficient Economy (ACEEE) 2010

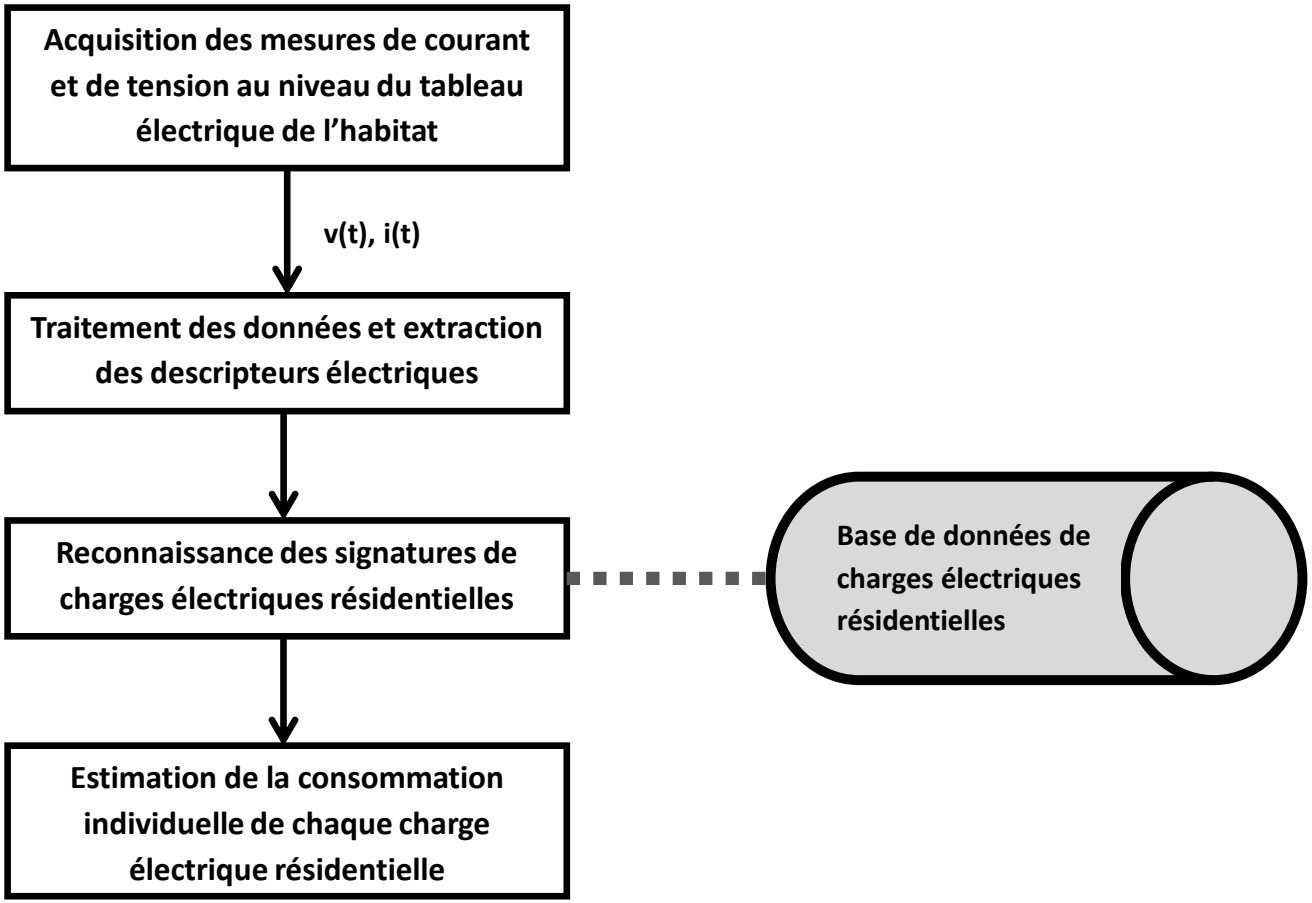
Objectifs des méthodes NILM

- Estimation de la consommation individuelle de chaque charge électrique résidentielle par désagrégation de la courbe de charge obtenue à partir **des mesures de courant et de tension** effectuées au niveau du tableau électrique de l'habitat (PCC).

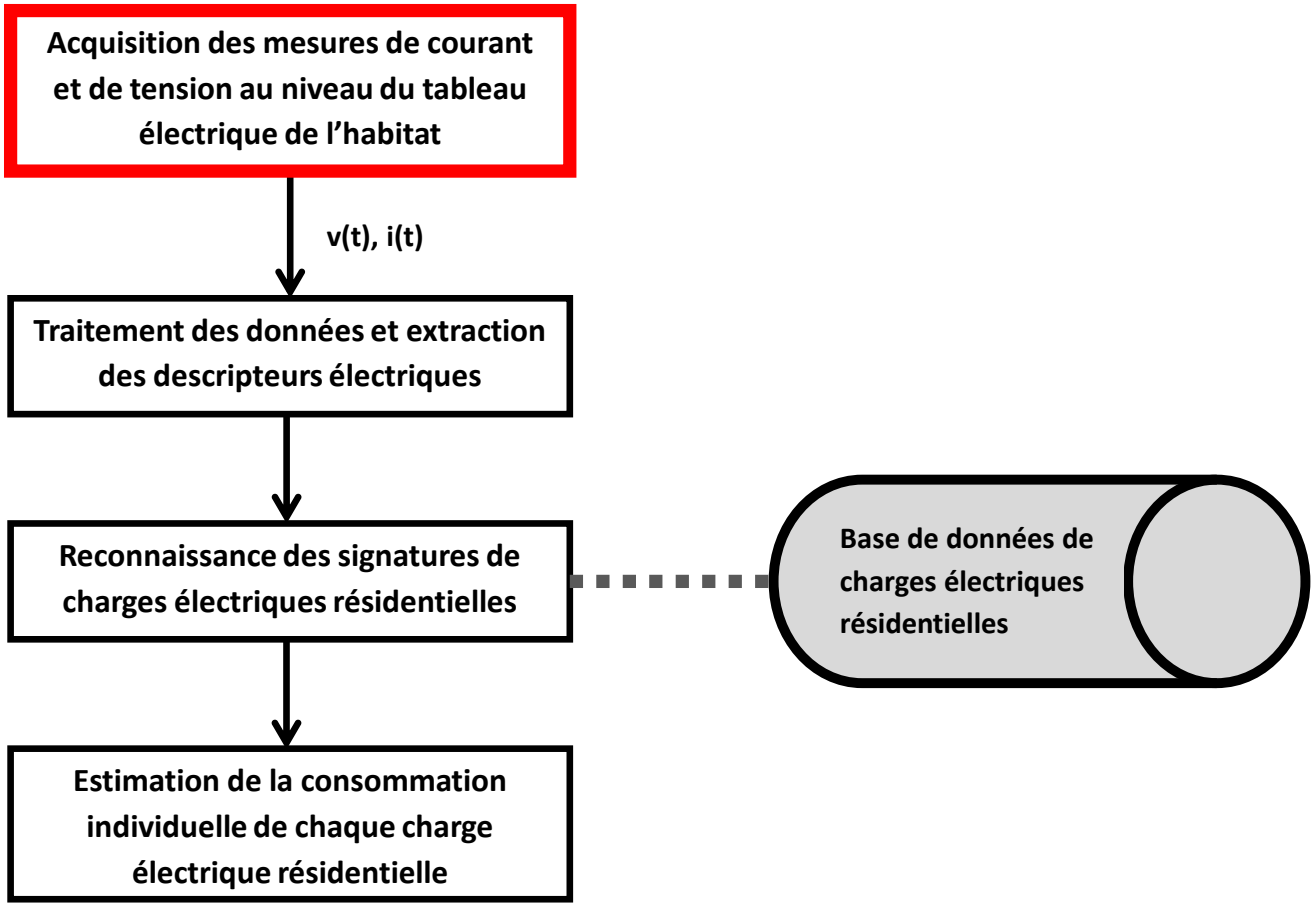




Méthodes NILM supervisées



Méthodes NILM supervisées



Problématique

Mise en place d'un dispositif à faible coût qui peut être déployé facilement pour l'acquisition des mesures de courant et de tension d'une habitation et de charges électriques individuelles pour leur exploitation en vue de la gestion énergétique

1 Introduction

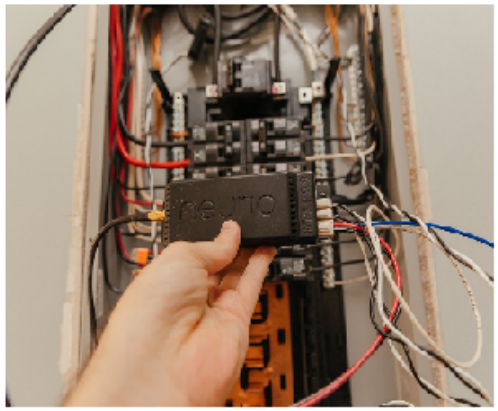
2 État de l'art des technologies pour les mesures de consommation résidentielle
- Caractéristiques des applications industrielles commercialisées
- Cahier des charges du prototype développé

3 Architecture du système d'acquisition

4 Résultats expérimentaux

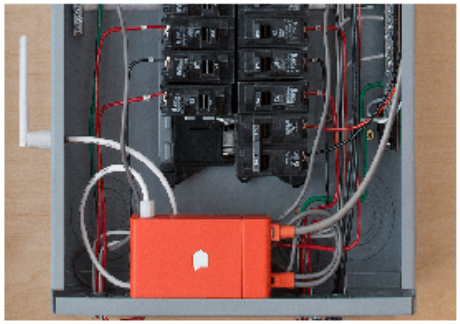
5 Conclusions et perspectives

Technologies commercialisées



Neurio

TED 5000



Sense Home Energy

Technologies commercialisées

	TED 5000	**Wattseeker**	**Neurio**	**Sense Home Energy**
Dispositif matériel	UTM + capteurs de courant*	Datalogger Lynx	UTM + capteurs de courant	
Protocole de communication (côté utilisateur)	Ethernet		Wi-Fi	
Fréquence d'échantillonnage	1 Hz	2 kHz	4 kHz	1 Hz
Prix	270 €	N/A	220 €	200 €
Société	The Energy Detective (TED)	Qualisteo	Neurio	Sense
Origine	États-Unis	France	Canada	

*: Installation par un professionnel

Critères du prototype développé

- $\Rightarrow$ Autonomie du système (alimentation électrique dédiée)
- $\Rightarrow$ Faible consommation
- $\Rightarrow$ Minimisation de l'effort d'installation du matériel
- $\Rightarrow$ Coût réduit
- $\Rightarrow$ Fréquence d'échantillonnage et résolution relativement élevées
- $\Rightarrow$ Mesure de la puissance souscrite d'un habitat normal ($\approx 6kW$)

1 Introduction

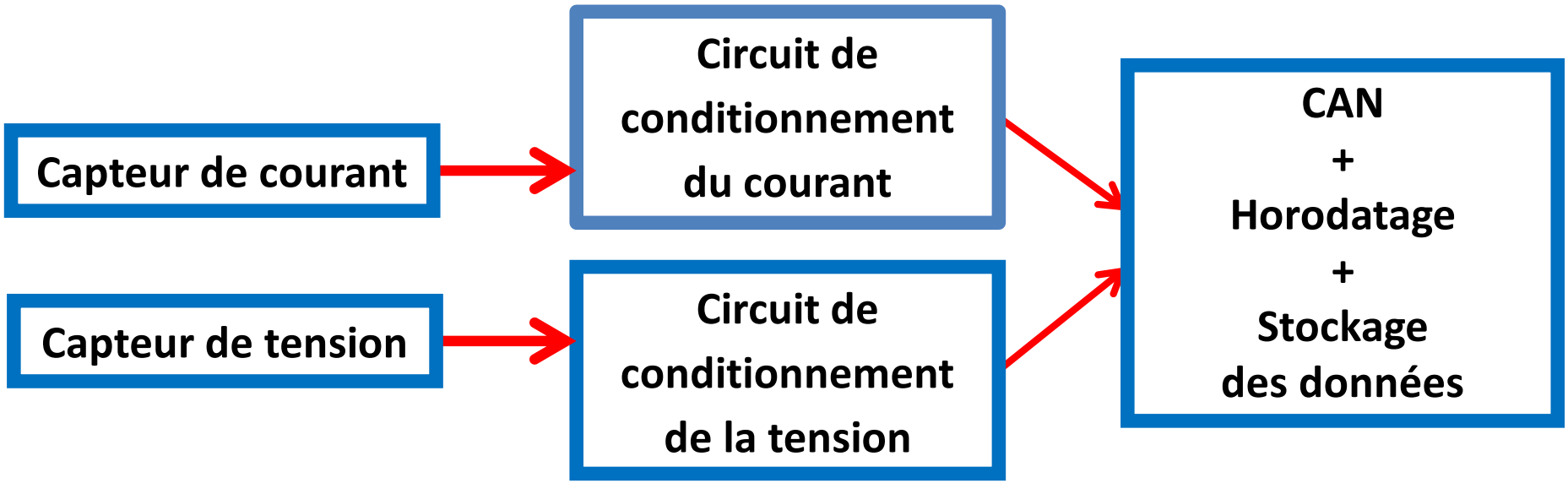
2 État de l'art des technologies pour les mesures de consommation résidentielle

3 Architecture du système d'acquisition
- Synoptique général
- Conditionnement du courant
- Conditionnement de la tension
- Échantillonnage et stockage des données

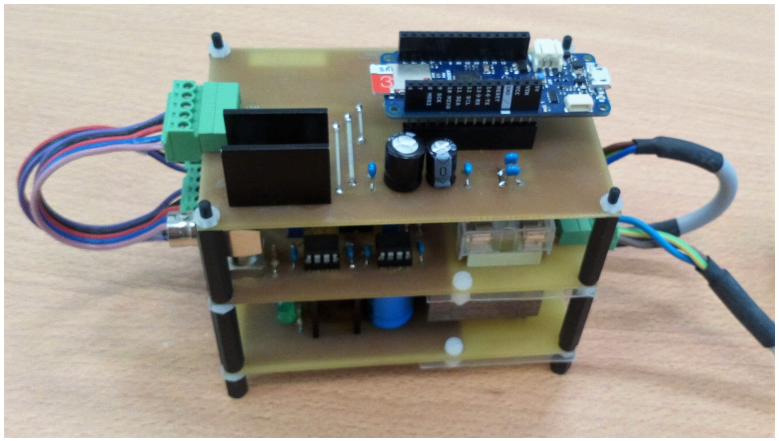
4 Résultats expérimentaux

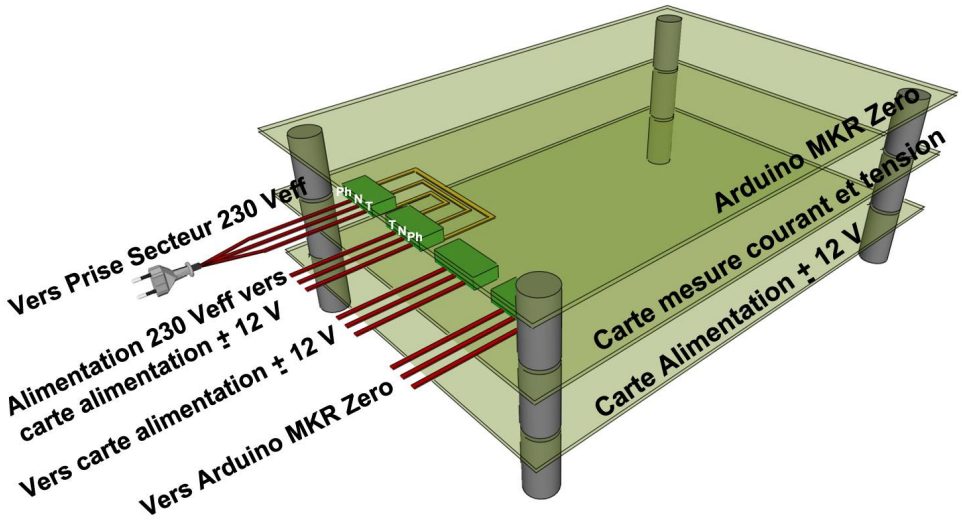
5 Conclusions et perspectives

Chaîne d'acquisition



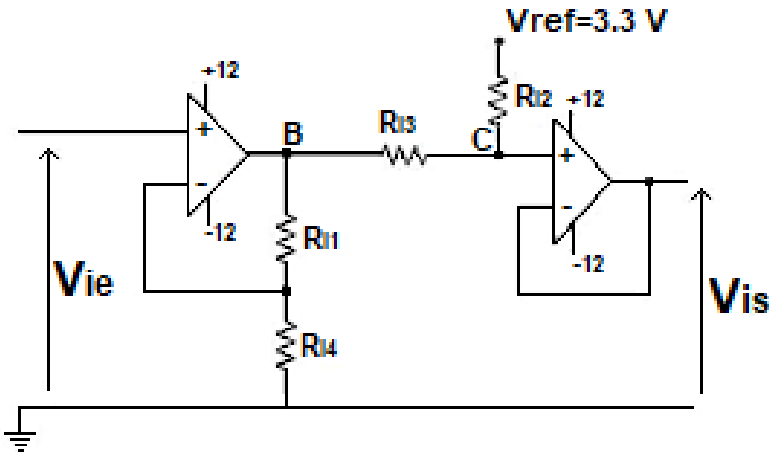
Prototype réalisé





- Branchement du dispositif à une prise de courant
- Intégration d'un transformateur 2X12V-5 VA, d'un pont redresseur et d'un circuit de filtrage dans la carte d'alimentation pour convertir le courant AC en courant DC
- 2 régulateurs de tension IC 7812 et IC 7912 pour obtenir une tension de sortie $\pm$ 12 V
- Microcontrôleur Arduino MKR Zero alimenté en 5 V via un régulateur de tension IC 7805
- Plage de tension tolérée par le microcontrôleur: **0-3.3 V**

Circuit de conditionnement du courant



- $V_{ie} = s.i$: tension délivrée par la sonde de courant
- i: courant mesuré sur une phase du réseau domestique
- s=10 mV/A: sensibilité de la sonde de courant
- Montage AOP (OP27) non inverseur (R_{I4}, R_{I1}=8.25 kΩ)
  $\Rightarrow V_B = \left(1 + \frac{R_{I4}}{R_{I1}}\right) V_{ie}$

- Pont diviseur résistif et montage AOP suiveur
- R_{I2}=R_{I3}=1 kΩ pour que $V_{is} = \frac{V_{ref}}{2}$ quand $i = 0$ A
- Lorsque le courant entrant i_+ est négligeable:

$$\frac{V_B - V_{is}}{R_{I3}} + \frac{V_{ref} - V_{is}}{R_{I2}} \approx 0A$$

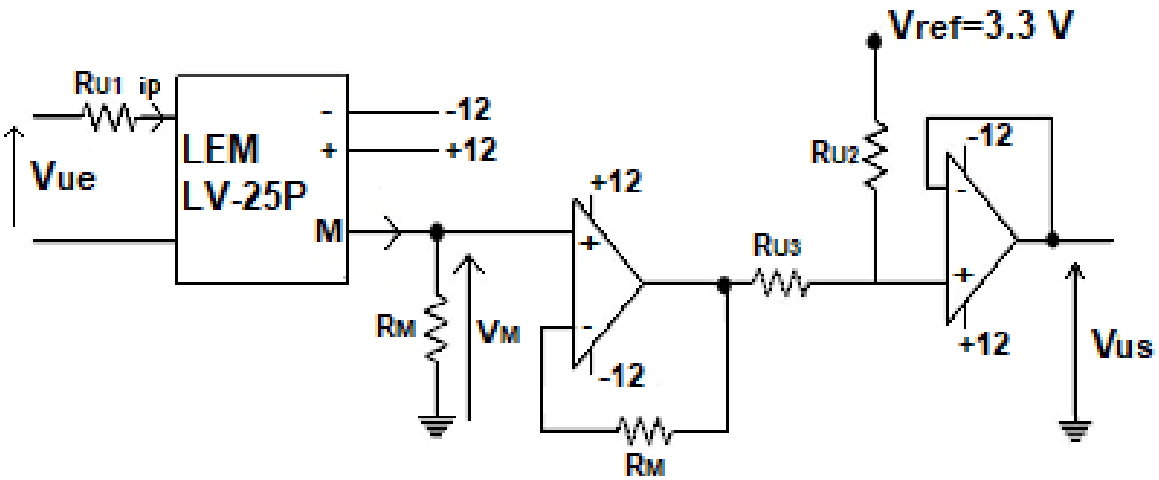
$$V_{is} = \frac{R_{I3}}{R_{I2} + R_{I3}} V_{ref} + \frac{R_{I2}}{R_{I2} + R_{I3}} \left(1 + \frac{R_{I1}}{R_{I4}}\right) s\, i$$

- Quand $V_{is} = 3.3$ V, i_{max}=35.67 A crête
  $\Rightarrow P_{max} = 230\, i_{max}/\sqrt{2} \approx 5802$ W

- Pas de quantification du courant:
  $q_I = \frac{q_V}{s} \frac{1+R_{I3}/R_{I2}}{1+R_{I1}/R_{I4}} \approx 69$ mA

  $\Rightarrow$ Pas de quantification de puissance:
  $q_P = \frac{q_I}{\sqrt{2}} 230 \approx 11.3$ W

Circuit de conditionnement de la tension



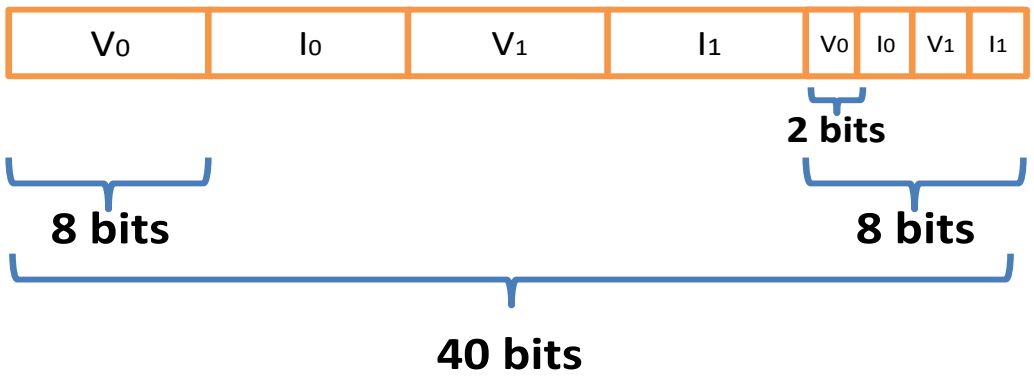
- Capteur de tension alternative à effet Hall avec un rapport de transformation de 2.5
- Tension d'entrée max: $V_{ue_{max}} = 230\sqrt{2}$ V, courant primaire dans la marge de tolérance du constructeur $i_{p_{max}} = 10$ mA
  $\Rightarrow R_{U1} = \frac{V_{ue_{max}}}{i_{p_{max}}} \approx 32.5$ kΩ
  $\approx$ 3 résistances en parallèle de 100 kΩ
- $V_M = 2.5 \frac{R_M}{R_{U1}} V_{ue}$

- Pont diviseur résistif et 2 AOPs montés en suiveurs
- $R_{U2} = R_{U3} = 1$ kΩ pour que $V_{us} = \frac{V_{ref}}{2}$ quand $V_{ue} = 0$ V
- Tension de sortie:
  $V_{us} = \frac{R_{U3}}{R_{U3}+R_{U2}} V_{ref} + \frac{2.5 R_{U2} R_M}{R_M (R_{U3}+R_{U2})} V_{ue}$
- Avec $R_M = 130\ \Omega$, $V_{us} = 3.11$V

CAN, échantillonnage et stockage des données

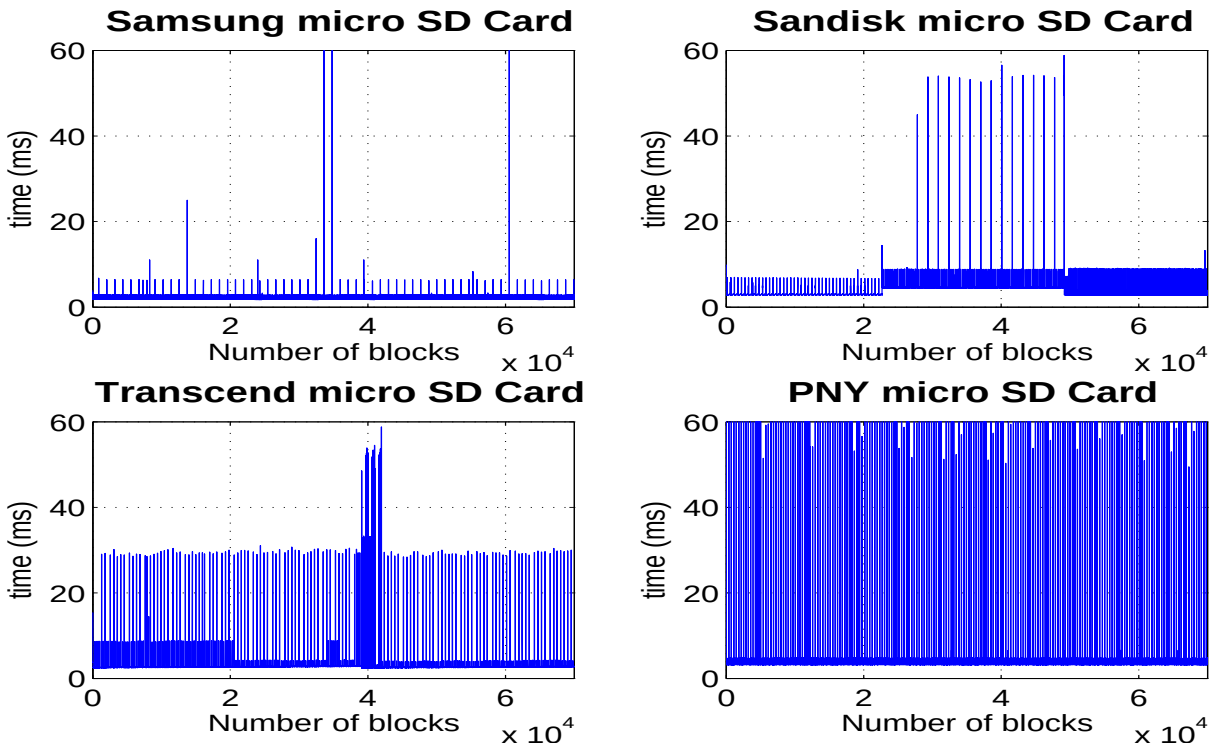
- Utilisation d'un microcontrôleur Arduino MKR Zero (32 KB de SRAM) avec une résolution de 10 bits + Horloge temps réel + carte micro-SD 32 Go

- Utilisation de bibliothèques pour diminuer le temps d'écriture dans la carte SD:
  - "FastADC.h" pour la gestion du CAN (compatible avec une résolution de 10 bits)
  - "SAMDtimer.h" pour la gestion des compteurs/décompteurs
  - "Sd2Fat.h" pour l'écriture dans la carte SD
- Fréquence d'échantillonnage F_e=5 kHz
- Acquisition de la tension et du courant à chaque exécution d'un service d'interruption
- Utilisation de 5 octets pour stocker 2 échantillons successifs de tension (U_0 et U_1) et 2 échantillons successifs de courant (I_0 et I_1)
- Utilisation de la carte SD comme une EEPROM structurée en blocs de 512 octets
- Écriture dans la carte SD au moyen de la fonction *cardwriteBlock()*



Choix de la carte SD

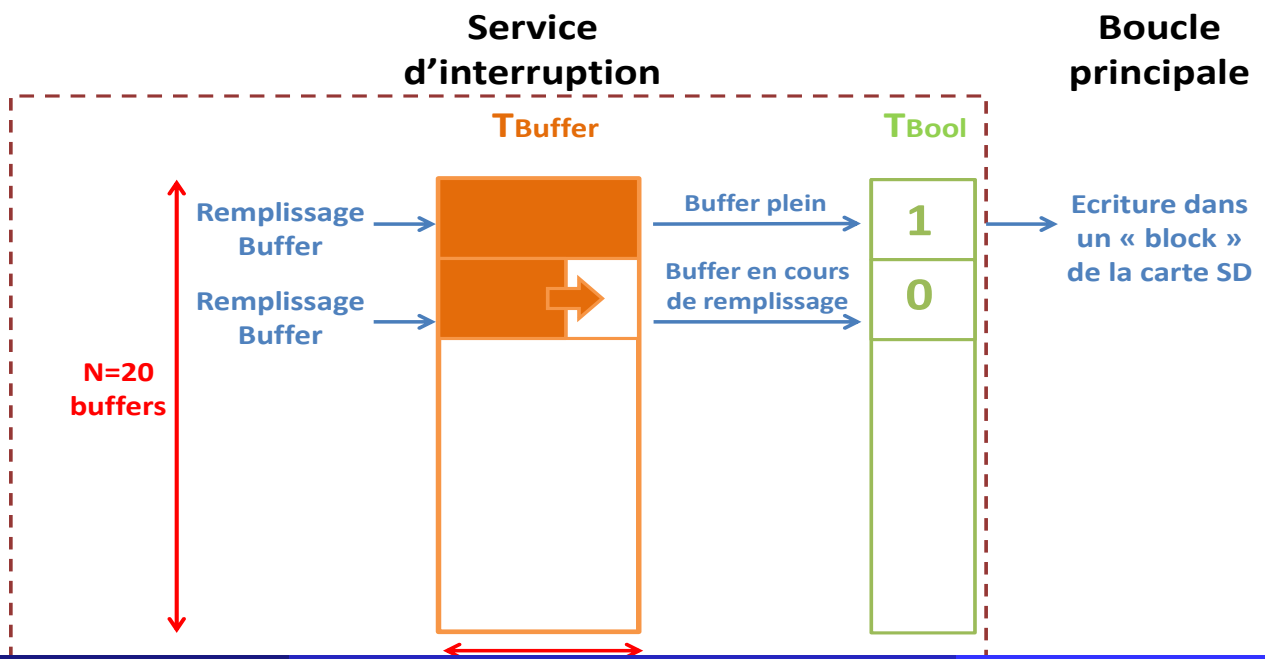
- Comparaison des performances de plusieurs cartes SD en terme de temps d'écriture dans les blocs de la carte moyennant la fonction *cardwriteblock()*



⇒ La carte SD Samsung EVO Plus de 32 Go de type UHSI (vitesse d'écriture de 20 Mo/s et durée de vie de 10 000 cycles d'écriture) a les meilleures performances avec un temps moyen d'écriture dans un bloc de 4 ms et moins de pics de temps d'écriture.

CAN, échantillonnage et stockage des données

- Utilisation d'un tableau T_{Buffer} de N=20 buffers de 510 octets (ou plus)
- Un buffer peut contenir 510×2/5=204 acquisitions de la tension et 204 acquisitions du courant
- Remplissage des buffers un à un
- Utilisation d'un tableau T_{Bool} de N=20 variables booléennes
- Une variable est mise à 1 quand un buffer est plein, sinon 0
- Signalisation à la boucle principale de cette mise à 1, écriture du buffer plein dans un bloc de la carte SD
  - temps nécessaire pour remplir un buffer: 204/5000≈ 40.8 ms
  - temps d'écriture dans un bloc de la carte SD ≈ 4 ms ⇒ $F_{e_{max}} = \frac{204}{4.10^{-3}} = 51$ kHz



CAN, échantillonnage et stockage des données

- Acquisition des données pendant: $\frac{204 \times 32.2^{30}}{5000 \times 512}$ s $\approx$ 1 mois
  (2 mois avec une carte SD de 64 Go)
- Utilisation du premier bloc de la carte SD comme entête: nombre total d'acquisitions, numéro du dernier bloc rempli, date et l'heure
- Utilisation de deux boutons-poussoirs:
  - Démarrer/arrêter une acquisition
  - Démarrer/arrêter un protocole de transmission des données enregistrées
    sur la carte SD vers un PC via le câble de liaison USB
- Possibilité de sélection des blocs à lire par l'utilisateur

1 Introduction

2 État de l'art des technologies pour les mesures de consommation résidentielle

3 Architecture du système d'acquisition

4 Résultats expérimentaux

5 Conclusions et perspectives

Acquisitions réalisées

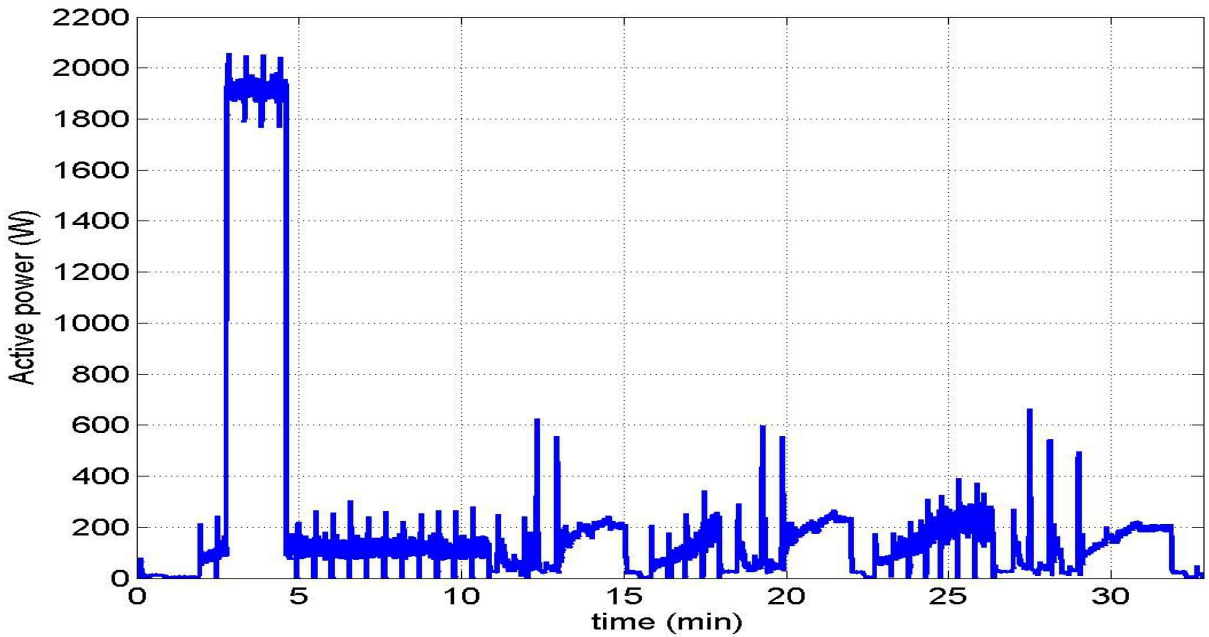
- Mesures de courant et de tension de charges électriques résidentielles individuelles
- Mesures de courant et de tension d'une habitation donnée
- Détermination du profil de consommation

$$P[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=n-M+1}^{n} v[k]i[k]$$

$M = F_e/F = \frac{5000}{50} = 100$: nombre d'échantillons par période,
$F = 50$ Hz: fréquence du réseau électrique

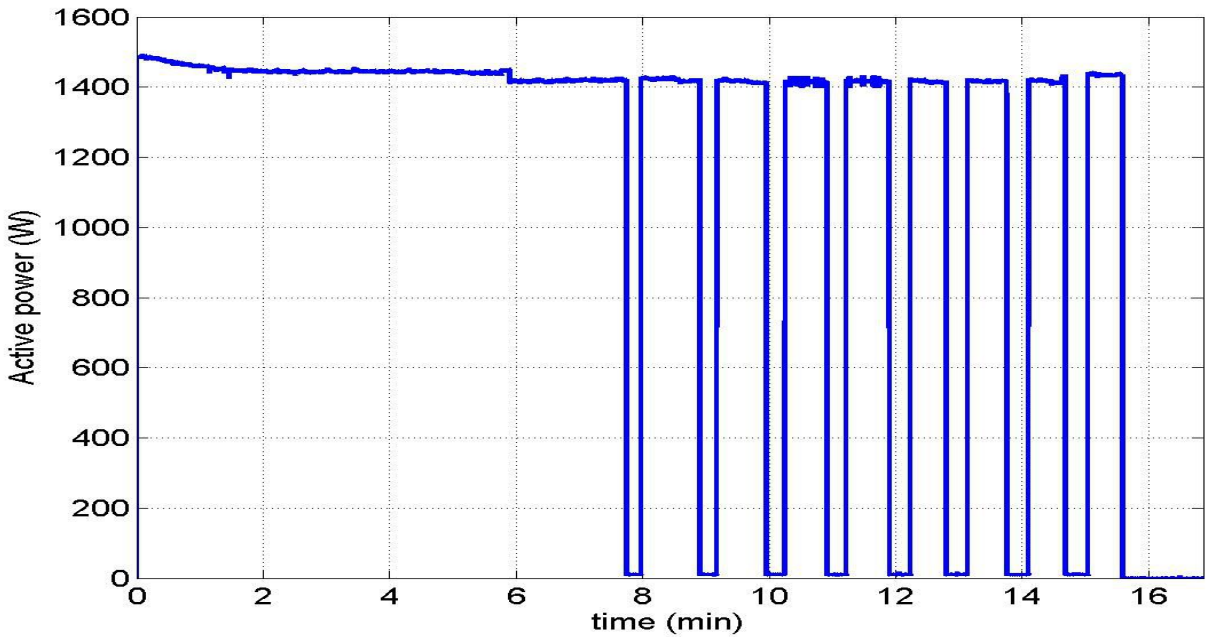
Mesure de charges électriques résidentielles individuelles 1/2

- Profil de consommation d'une machine à laver
  - 30°C, mode économique, 800 tr/min
  - chauffage de l'eau, rinçage et essorage.



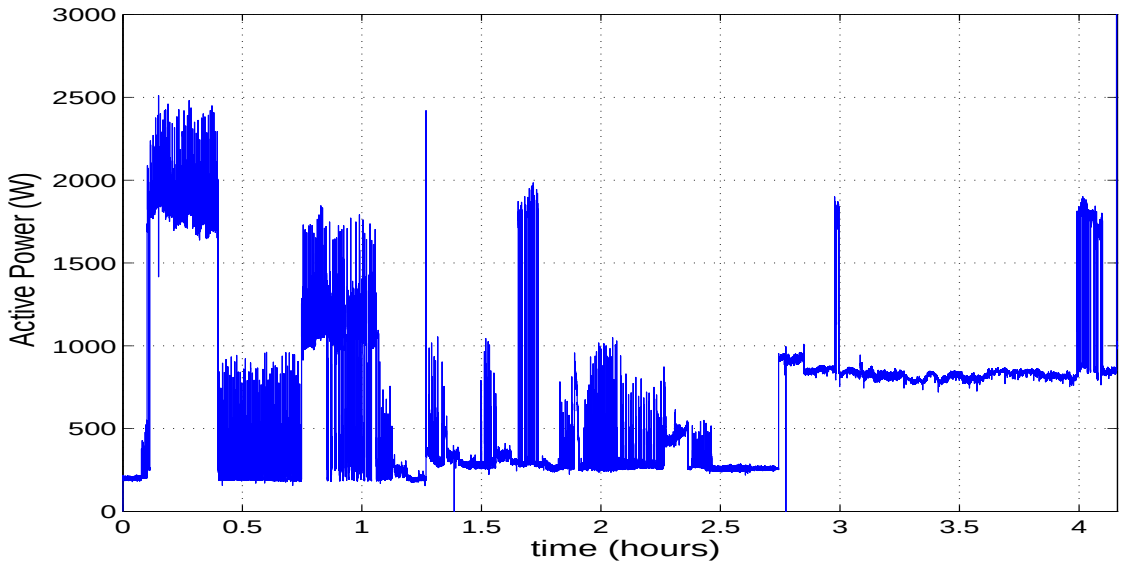
Mesure de charges électriques résidentielles individuelles 2/2

- Profil de consommation d'un four électrique
  - 180°C, fonctionnement tout ou rien
  - phase de chauffage



Mesure d'une habitation donnée

- Profil de 24h de consommation d'une habitation (extrait de 4h): activation d'une machine à laver pendant 2h30, allumage d'un écran LCD puis d'un four électrique
- Plancher de consommation de 250 W: fonctionnement de 2 routeurs Wi-Fi et 5 chargeurs de téléphones portables.



1 Introduction

2 État de l'art des technologies pour les mesures de consommation résidentielle

3 Architecture du système d'acquisition

4 Résultats expérimentaux

5 Conclusions et perspectives
- Conclusions
- Perspectives

Conclusions

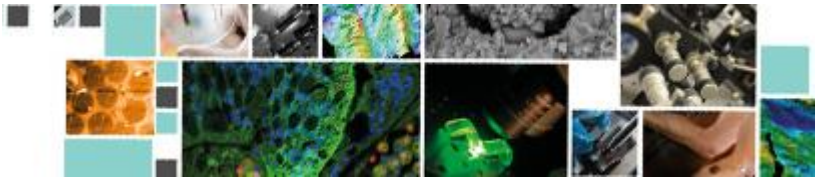
- Conception et réalisation d'un système d'acquisition des **mesures de courant et de tension** d'une habitation
- Système proposé à faible coût avec:

  -une faible consommation énergétique
  -une **facilité d'installation**,
  -une fréquence d'échantillonnage de **5 kHz**,
  -une capacité de mémoire permettant **l'acquisition de données pendant un mois**.
- Utilisation d'une carte **Arduino MKR Zero** (horloge temps-réel, lecteur de cartes SD) et de **capteurs de courant et de tension** et réalisation de leurs **circuits de conditionnement**
- Technique de **compression de données sans pertes** pour plus de stockage dans la carte SD

Perspectives

- Communication Wi-Fi avec un serveur
- Augmentation de la fréquence d'échantillonnage (**Dilemme**: $\nearrow \mathrm{F_e}$: $\searrow$ durée d'acquisition)
- Augmentation de la résolution
- Autonomie en énergie
- Amélioration du packaging
- Évaluation du système de compression sans perte (ratio taux-de-compression/complexité-calcul)
- Gestion d'énergie en temps réel

Merci de votre attention.



C2I 2019 : 8ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation

Caractérisation de sources thermiques par excitation Dirac

Marie-Marthe GROZ[1]

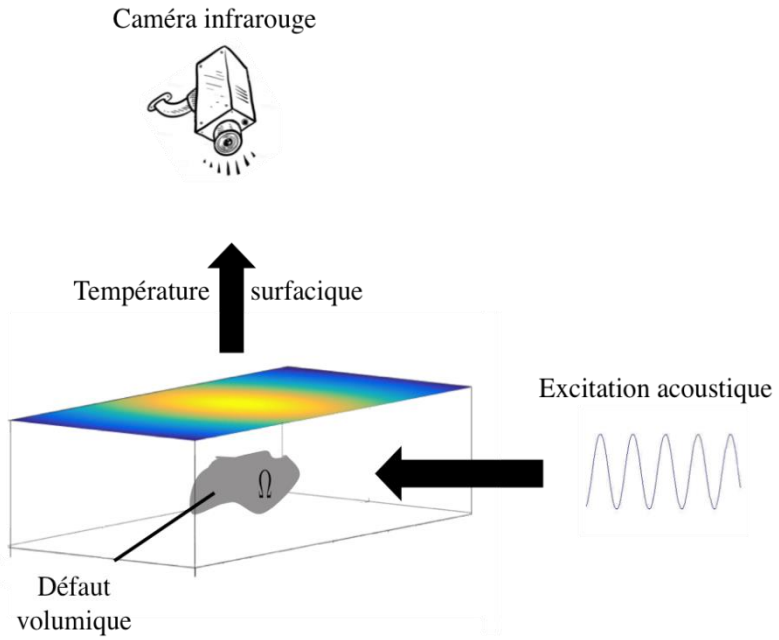
Anissa MEZIANE[1], Arantza MENDIOROZ[2], Agustin SALAZAR[2],
Ricardo CELORRIO[3], Christophe PRADÈRE[1]

[1] Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Bordeaux, FRANCE
[2] Departamento de Fisica Aplicada I, Universidad del Pais Vasco UPV/EHU, Bilbao, SPAIN
[3] Departamento de Matematica Aplicada, EINA/IUMA, Universidad de Zaragova, SPAIN

- Introduction
  - Reconstruction par excitation Dirac
    - Reconstruction 1D
    - Régularisation
    - Généralisation : reconstruction 2D et 2.5D
  - Conclusion & Perspectives

Contrôle Non-Destructif (C.N.D.)

Ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader.



Principe de la sonothermographie

Paramètres

- Entrée : excitation acoustique
  - Lock-In
  - Burst
  - Flash
  - ***Dirac***
  - ...
- Sortie : champ de température à la surface du matériau

Introduction

Thermique :

Données : mesures de surface

Avantages : - propriétés thermiques du matériau

- caractérisation de défauts

Limitations : détection en profondeur

Acoustique :

Données : ondes volumiques longitudinales/transversales

Avantages : - propriétés acoustiques/structurelles du matériau

- caractérisation de défauts

Limitations : multiples réflections des ondes

Etudes effectuées :

- NDT evaluation by lock-in thermography -> G. Busse, A. Mendioroz…
- NDT thermal evaluation by pulsed thermography - > J.C. Krapez, D. Balageas…
- NDT flash thermography on composites -> S. Shepard…

Introduction

Thermique :

Données : mesures de surface

Avantages : - propriétés themiques du matériau

- caractérisation de défauts

Limitations : détection en profondeur

Acoustique :

Données : ondes volumiques longitudinales/transversales

Avantages : - propriétés acoustiques/structurelles du matériau

- caractérisation de défauts

Limitations : multiples réflections des ondes

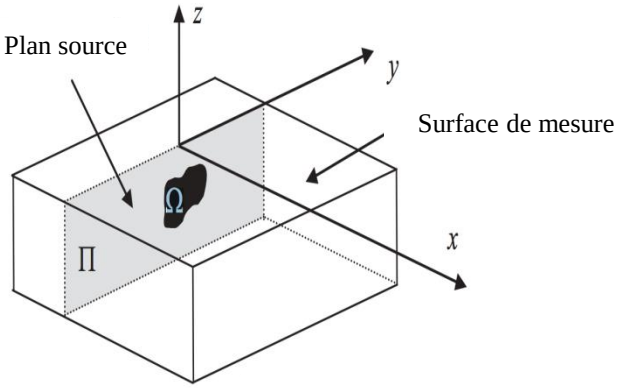
Etudes effectuées :

- NDT evaluation by lock-in thermography -> G. Busse, A. Mendioroz…
- NDT thermal evaluation by pulsed thermography - > J.C. Krapez, D. Balageas…
- NDT flash thermography on composites -> S. Shepard…

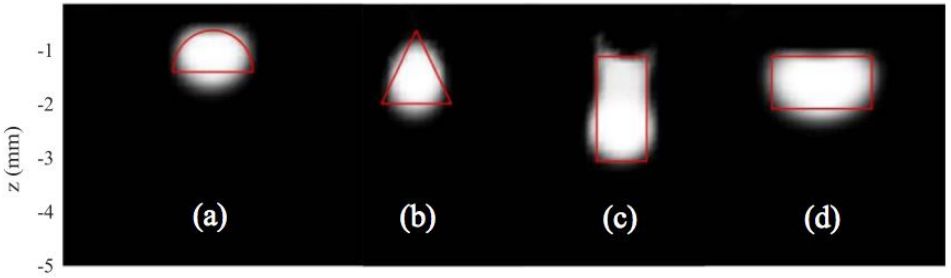
Objectif de la thèse : est-il possible de caractériser des défauts volumiques ?

-> Acoustique
-> Thermique } ***couplage***
-> Problèmes inverses

Introduction

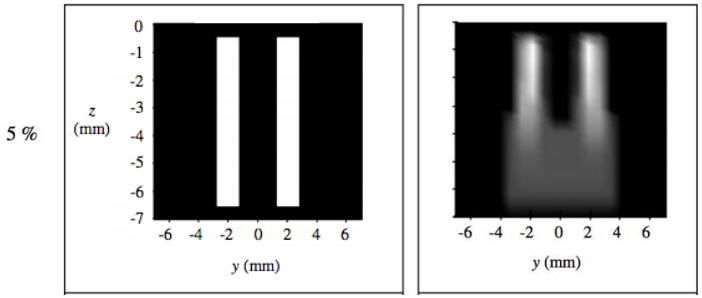


Excitation « burst »

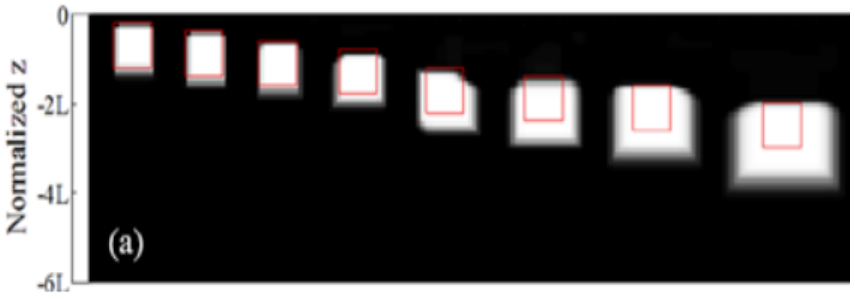


A. Mendioroz *et al.*, NDT&E International 84 (2016)

Excitation « Lock-In »



R. Celorrio *et al.*, Meas. Sci. Technol 24 (2013)



A. Mendioroz *et al.*, Int J Thermophys (2014)

- Introduction

- Reconstruction par excitation Dirac
  - Reconstruction 1D
  - Régularisation
  - Généralisation : reconstruction 2D et 2.5D

- Conclusion & Perspectives

Excitation Dirac

Problème direct : réponse thermique impulsionnelle d'un point source situé en (x', y', z')

$$\mathbf{I}_{Dirac}(x,y,z,t) = \frac{1}{8\rho C_p(\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4\alpha t}\right) \exp\left(-\frac{(y-y')^2}{4\alpha t}\right) \exp\left(-\frac{(z-z')^2}{4\alpha t}\right)$$

Avantages :

→ Solution analytique = simple et directe

→ Séparabilité spatiale

Réponse thermique impulsionnelle d'une source ***étendue*** :

$$T(r,t) = \int_{\text{materiau}} Q(r')\mathbf{I}_{Dirac}(r-r',t)\mathrm{d}r'$$

Reconstruction par excitation Dirac

Source thermique : distribution spatiale

Matrice opérateur →

$$\begin{pmatrix} \mathrm{I}_{Dirac}^{(1)} \\ \mathrm{I}_{Dirac}^{(2)} \\ \vdots \\ \mathrm{I}_{Dirac}^{(n)} \end{pmatrix}^{T} [\Omega] = \begin{bmatrix} T_{mes}^{(1)} \\ T_{mes}^{(2)} \\ \vdots \\ T_{mes}^{(n)} \end{bmatrix}$$

← *Température mesurée à la surface, pour tout temps $t^{(i)}$*

$$\mathbf{I}\ \Omega = \mathrm{T}_{mes}$$

Reconstruction par excitation Dirac

Source thermique : distribution spatiale

Matrice opérateur →

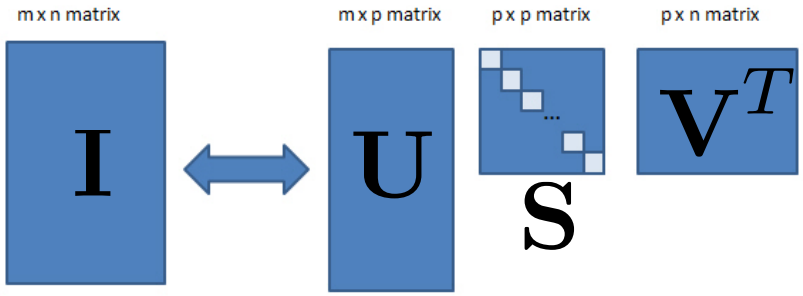
$$\begin{pmatrix} \mathrm{I}_{Dirac}^{(1)} \\ \mathrm{I}_{Dirac}^{(2)} \\ \vdots \\ \mathrm{I}_{Dirac}^{(n)} \end{pmatrix}^T [\Omega] = \begin{bmatrix} T_{mes}^{(1)} \\ T_{mes}^{(2)} \\ \vdots \\ T_{mes}^{(n)} \end{bmatrix}$$

← *Température mesurée à la surface, pour tout temps $t^{(i)}$*

$$\mathbf{I}\,\Omega = \mathrm{T}_{mes}$$

SVD (*Décomposition en Valeurs Singulières*) :

$$\mathbf{I} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$$



S = diagonale

$s_1 > s_2 > \cdots > s_p \geq 0$

$$\mathbf{V}\mathbf{V}^T = \mathbf{I}_p$$

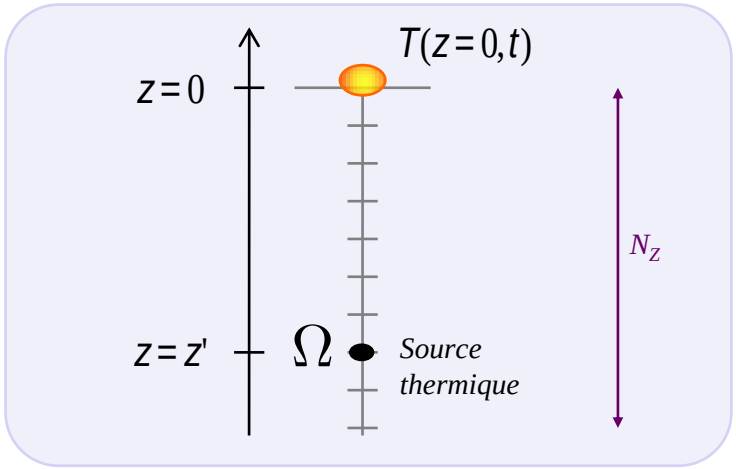
$$\mathbf{U}\mathbf{U}^T = \mathbf{I}_m$$

Reconstruction par excitation Dirac

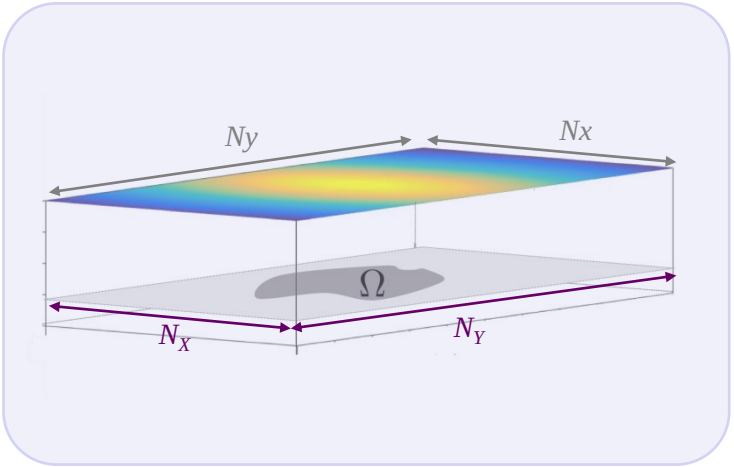
Problème inverse :

$$\mathbf{I}\,\Omega = \mathrm{T}_{mes}$$

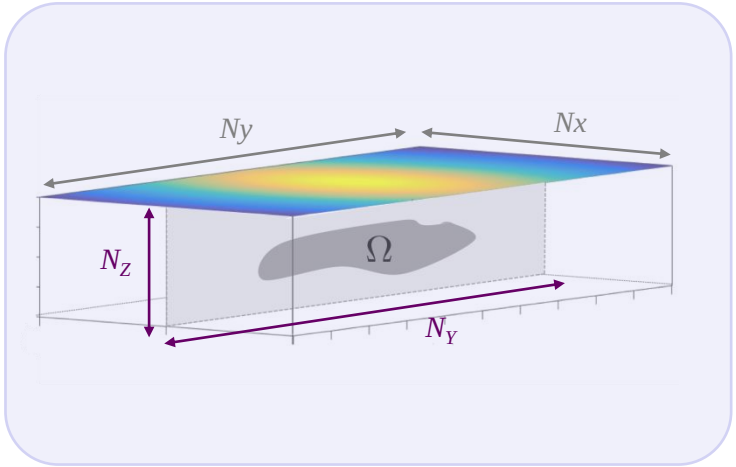
1D



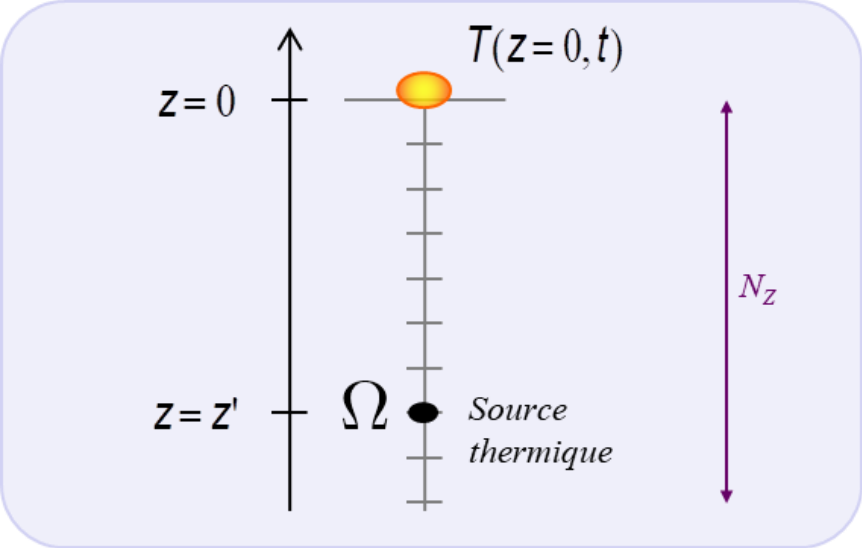
2D



2.5D

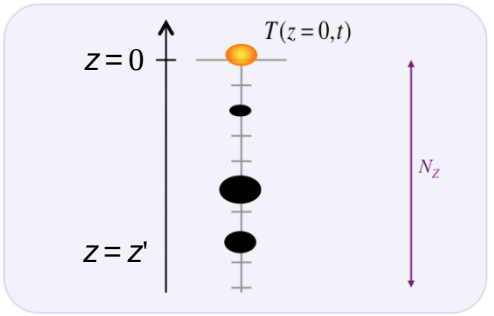


➢ Reconstruction 1D



Reconstruction 1D

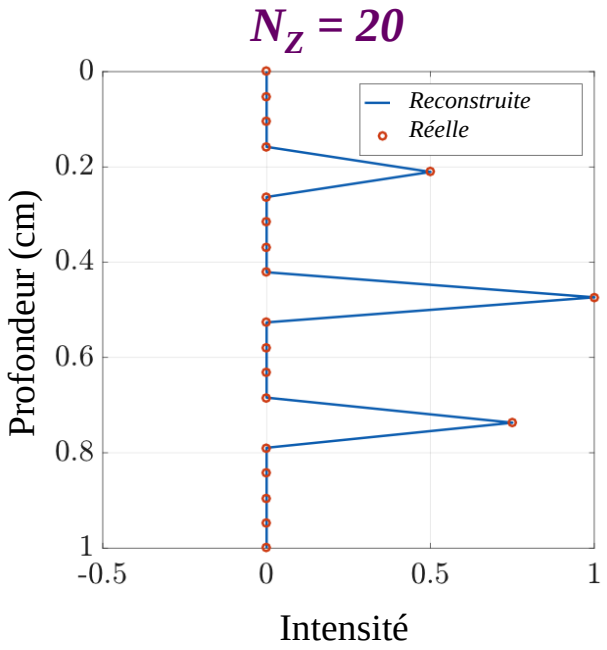
$$\mathbf{I}\,\Omega = \mathrm{T}_{mes} \qquad \boxed{\Omega = \mathbf{V}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{U}^{T}T_{mes}}$$

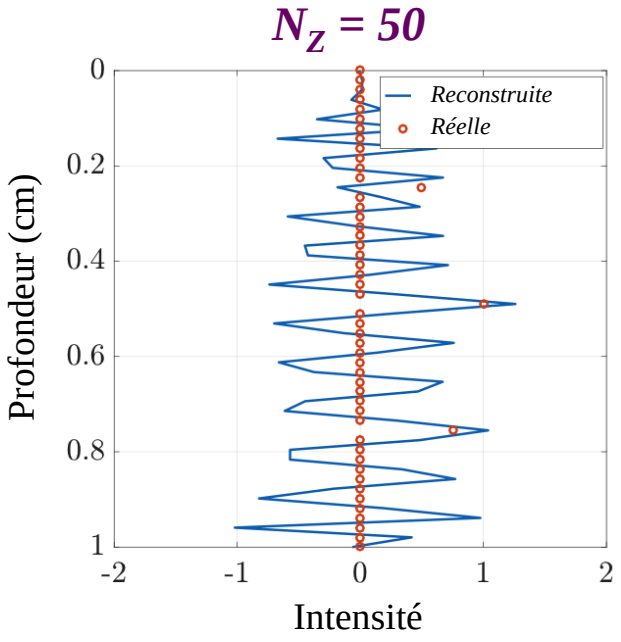


Potentiels de la méthode Dirac

→ Multi-sources

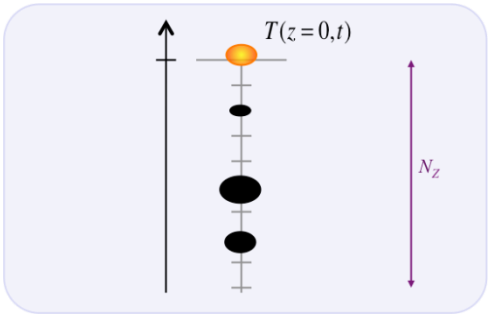
→ Différentes intensités

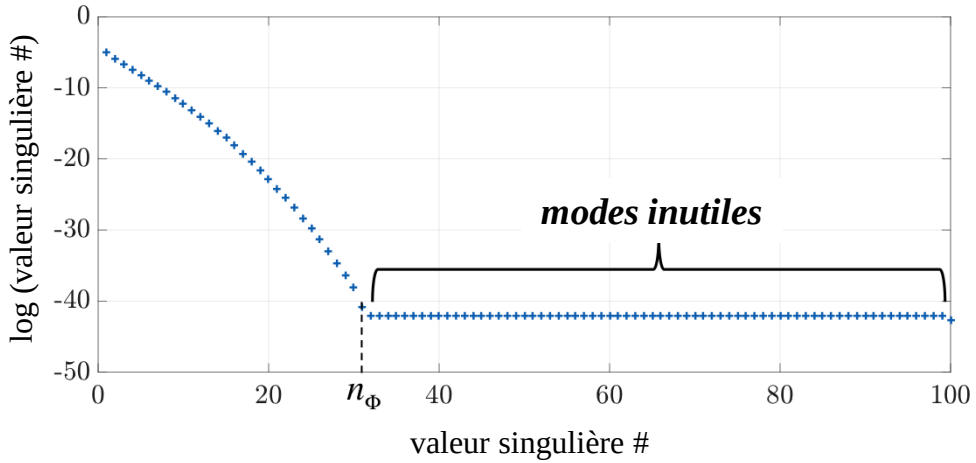


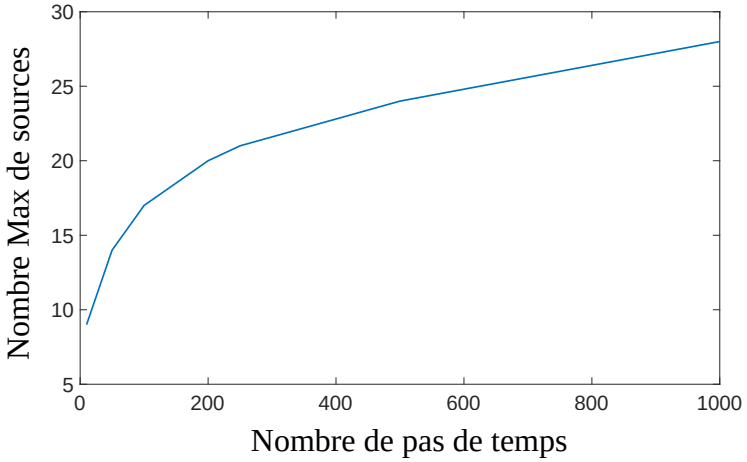


Reconstruction 1D

$$\mathbf{I}\,\Omega = \mathrm{T}_{mes} \qquad \Omega = \mathbf{V}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{U}^{T}T_{mes}$$







Nombre de sources limité !!!

-> déterminé par la SVD

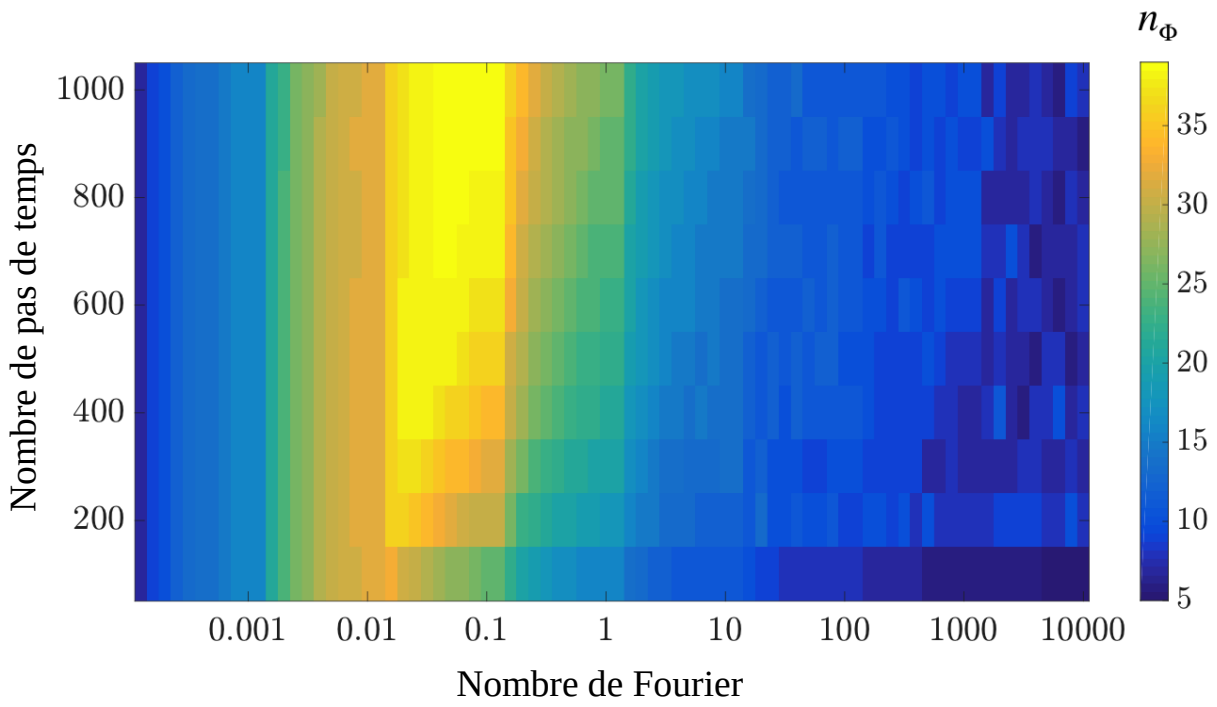
La reconstruction dépend du paramètre temporel

Reconstruction 1D

Critère dépendant du nombre de Fourier :

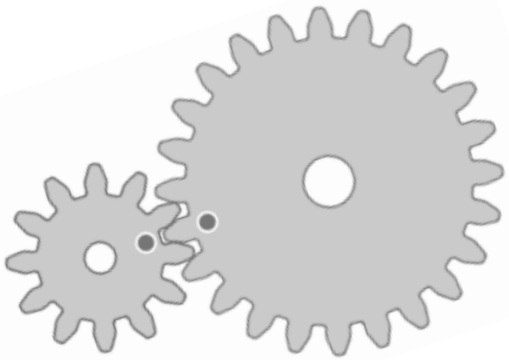
$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta L}$$

α = diffusivité
Δt = intervalle de temps entre t_0 et t_f
ΔL = épaisseur/profondeur



Nombre de sources reconstructibles en fonction du nombre de Fourier

➢ Régularisation

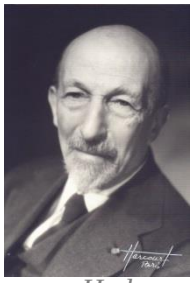


Régularisation

Données réelles
*=> **bruit***

Problème inverse « bien-posé » (*cf. Hadamard*)

- Solution *existe* ✓
- Solution *unique* ✓
- Solution *stable* ✗



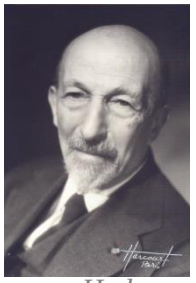
Jacques Hadamard
(1865-1963)

Régularisation

Données réelles
*=> **bruit***

Problème inverse « bien-posé » (*cf. Hadamard*)

- Solution *existe* ✓
- Solution *unique* ✓
- Solution *stable* ✗



Jacques Hadamard
(1865-1963)

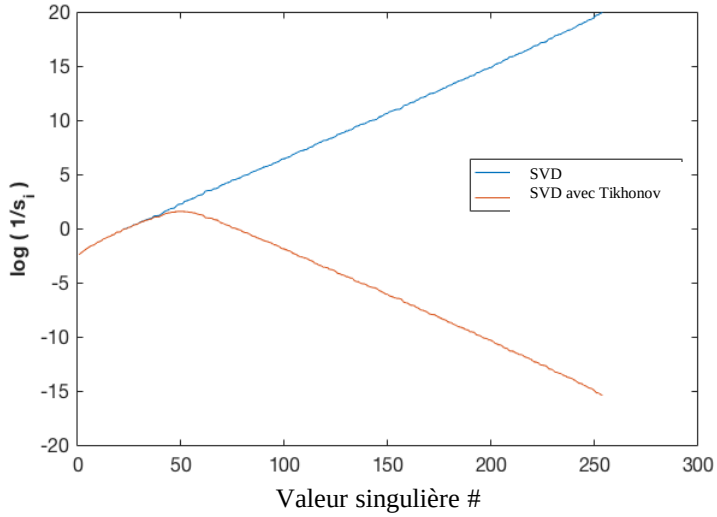
Régularisation

- Tikhonov d'ordre 0 (TK_0): $J(g) = TK_0(g) = \iint_\pi |g|^2 \mathrm{d}S$
- Variation Totale (TV) : $J(g) = TV(g) = \iint_\pi |\nabla g|^2 \mathrm{d}S$

R. Celorrio *et al.*, Meas. Sci. Technol 24 (2013)

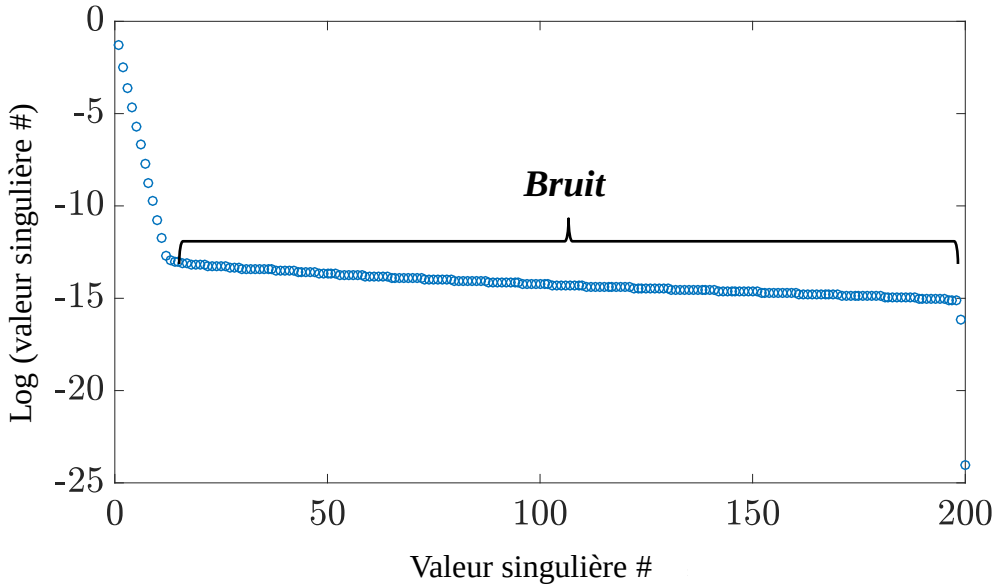
A. Mendioroz *et al.*, NDT&E International 84 (2016)

Tikhonov : a pour effet de « pondérer » les valeurs singulières



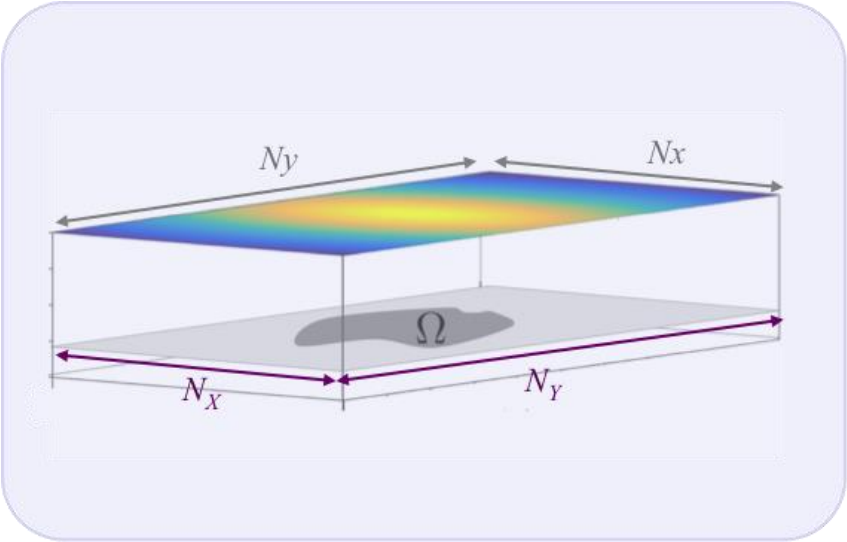
Régularisation

SVD sur T_{mes} => réduction du bruit

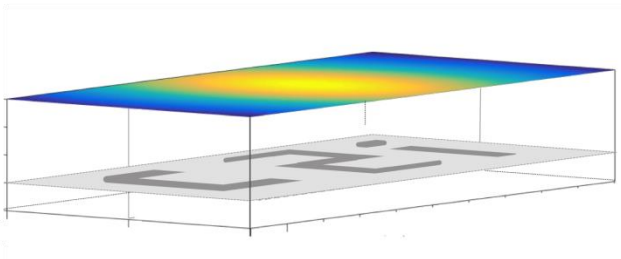


Seuls les premiers modes de la température-SVD sont utilisés !

➢ Généralisation : reconstruction 2D



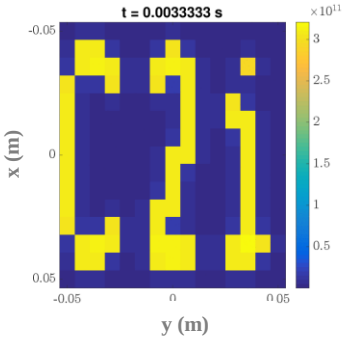
Généralisation : reconstruction 2D et 2.5D



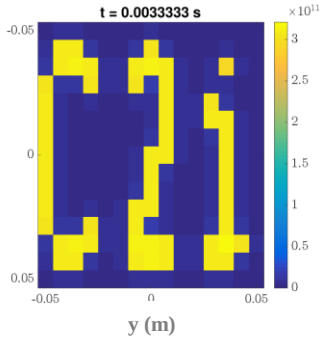
Température à la surface

Profondeur = 5mm

Données numériques
5% de bruit

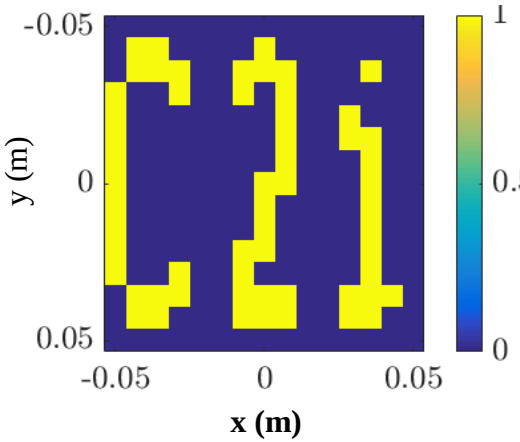


Température SVD

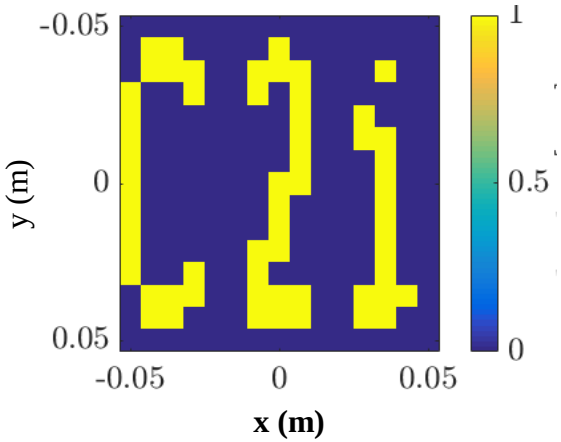


Température bruitée

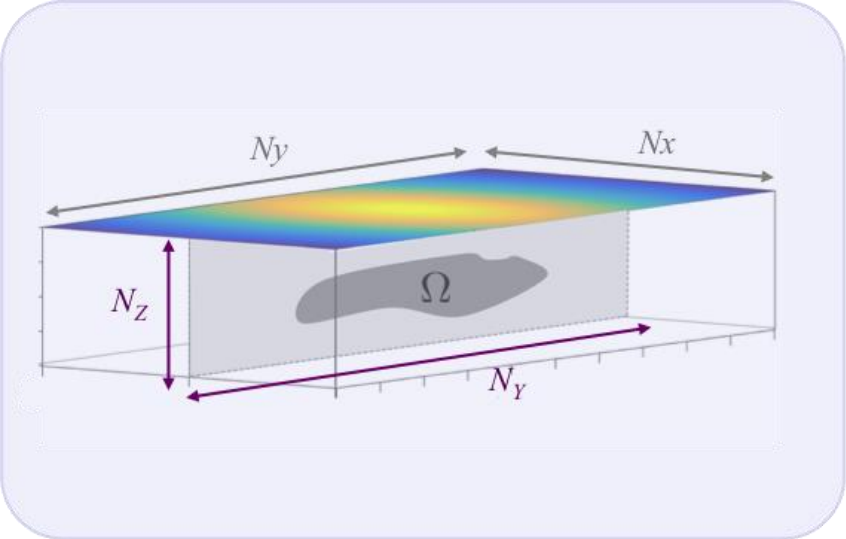
Source réelle



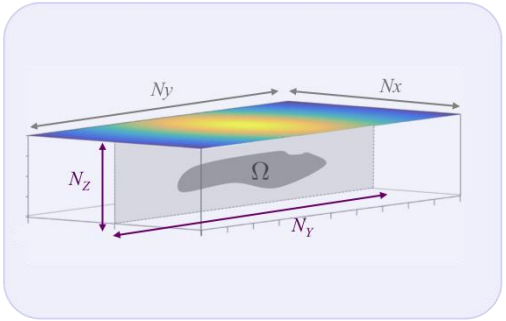
Source reconstruite



➢ Généralisation : reconstruction 2.5D

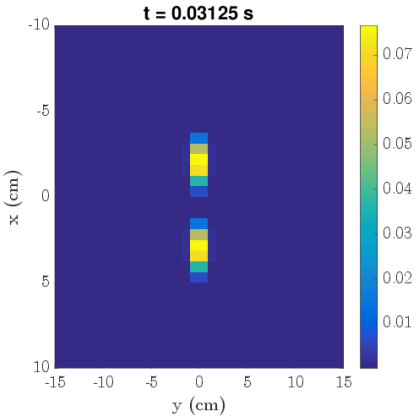


Généralisation : reconstruction 2D et 2.5D

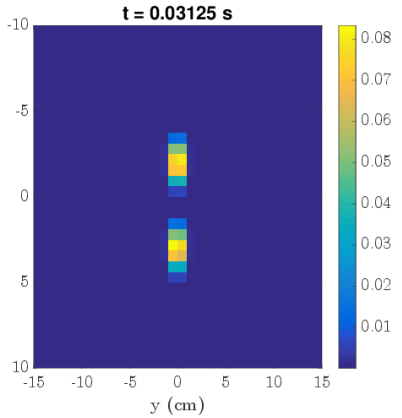


Température à la surface

Données numériques
10% de bruit



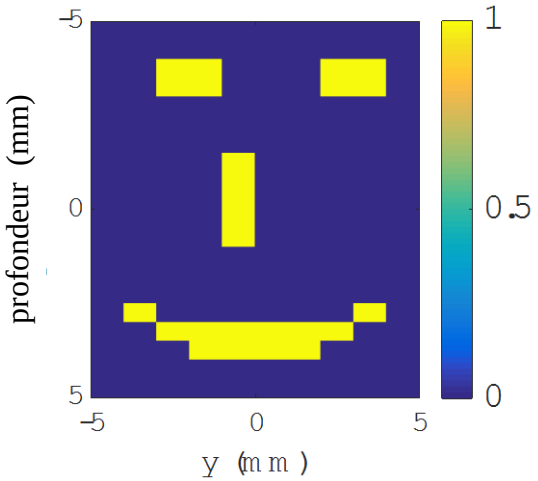
SVD



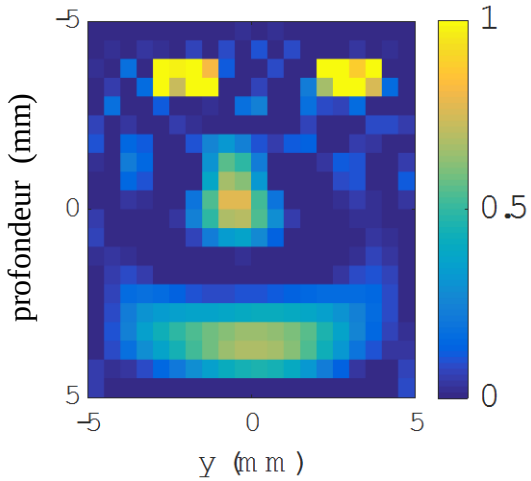
Température réelle

Sources dans le plan vertical

Source réelle



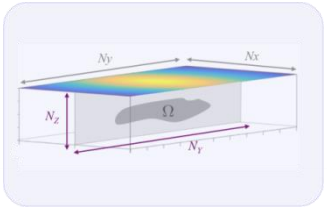
Reconstruction, régularisation

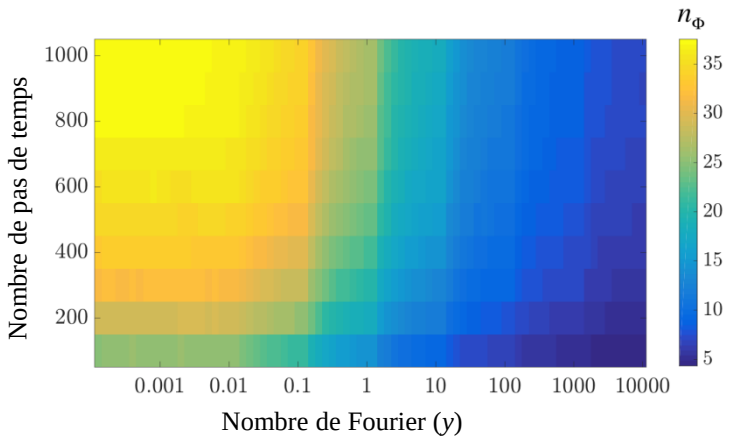


Généralisation : reconstruction 2D et 2.5D

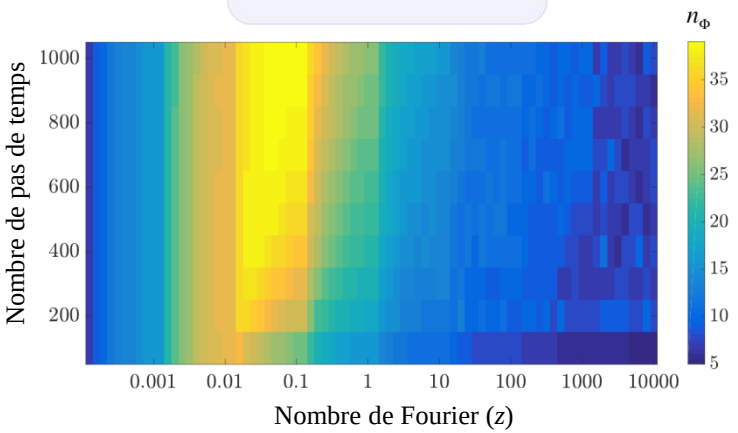
Critère dépendant du nombre de Fourier :

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta L}$$





Direction X ou Y



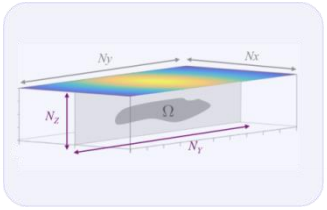
Direction Z

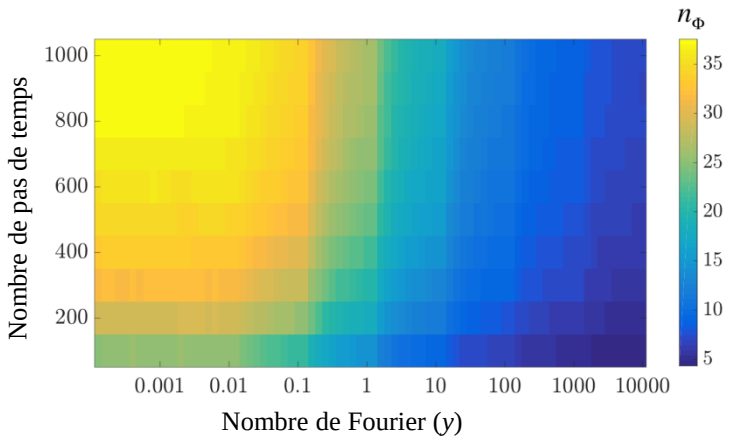
Paramètre limitant = profondeur (*Z*)

Généralisation : reconstruction 2D et 2.5D

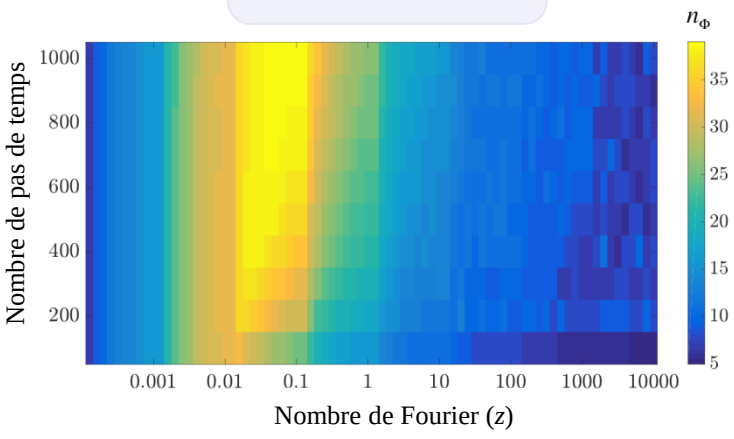
Critère dépendant du nombre de Fourier :

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta L}$$



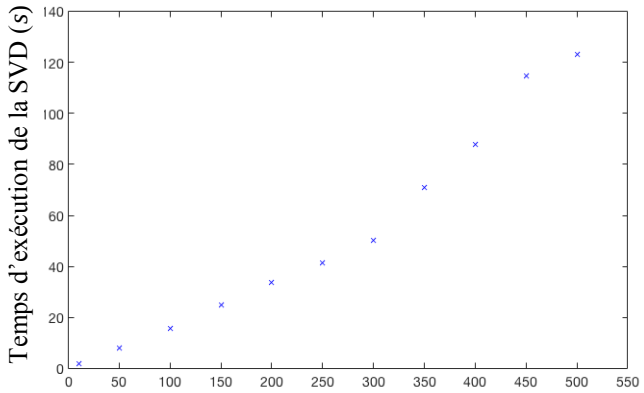


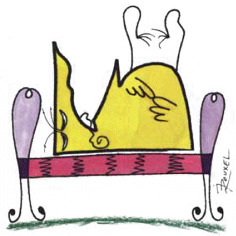
Direction X ou Y



Direction Z

Paramètre limitant = profondeur (Z)





Temps de calcul important

- Introduction
- Reconstruction par excitation Dirac
  - Reconstruction 1D
  - Régularisation
  - Généralisation : reconstruction 2D et 2.5D
- Conclusion & Perspectives

Conclusion

Reconstruction de sources via Dirac

Problème 1D :

- Nombre de sources ***limité*** et déterminé par la SVD
- Critère en fonction du nombre de Fourier

Problème 2D :

- Pas de difficultés

Problème 2.5D :

- Problème inverse = temps de calcul important

Perspectives

- Reconstruction en 3D
- Surdiscrétisation ?

Conclusion & Perspectives

Conclusion

Reconstruction de sources via Dirac

Problème 1D :

- Nombre de sources ***limitées*** et déterminée par la SVD
- Critère en fonction du nombre de Fourier

Problème 2D :

- Pas de difficultés

Problème 2.5D :

- Problème inverse = temps de calcul important

Perspectives

- Reconstruction en 3D
- Surdiscrétisation ?

Merci pour votre attention !

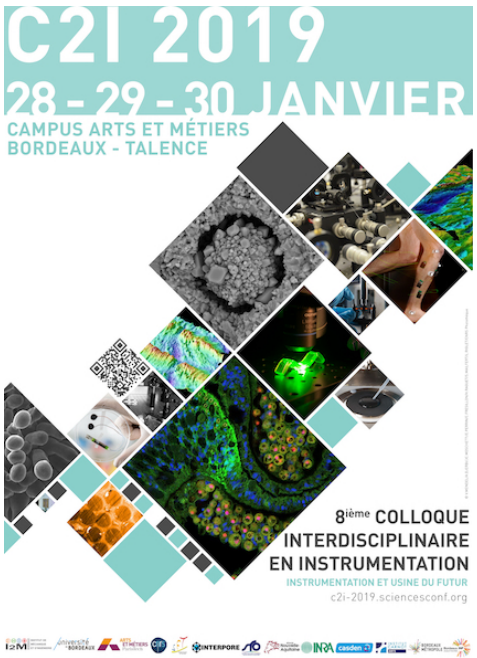
Des questions ?

Mesures aberrantes : détection, localisation, suppression, acceptation et robustesse

José Ragot

Université de Lorraine (UdL)

Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CNRS)



1. Généralités et exemples introductifs

La validation (ou l'invalidation) de données est constituée de cinq phases essentielles

- **Détection** — mise en évidence d'événements (symptômes) qui peuvent témoigner de la présence de valeurs aberrantes.
- **Isolation** — analyse des événements pour identifier et localiser les valeurs aberrantes.
- **Identification** — quantification des valeurs aberrantes (durée et amplitude)
- **Pronostic** — compte tenu des informations passées et présentes, prévoir l'évolution des valeurs aberrrantes.
- **Reconfiguration** — remise en état des composants défectueux du système de mesure de façon à lui permettre de satisfaire à sa mission.

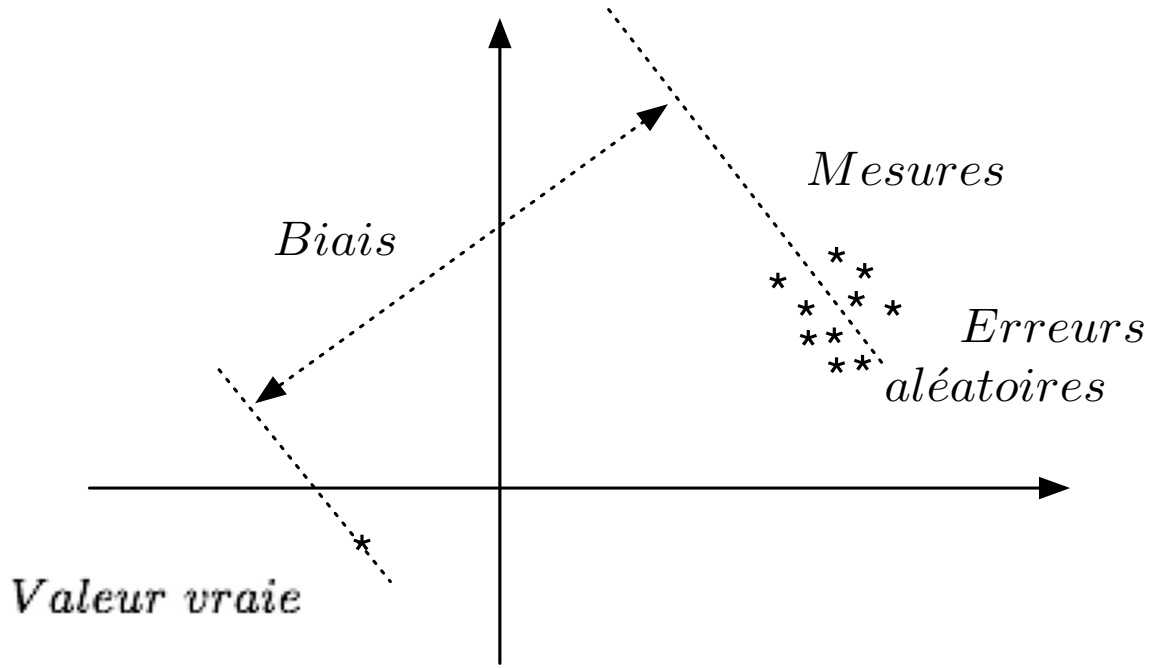
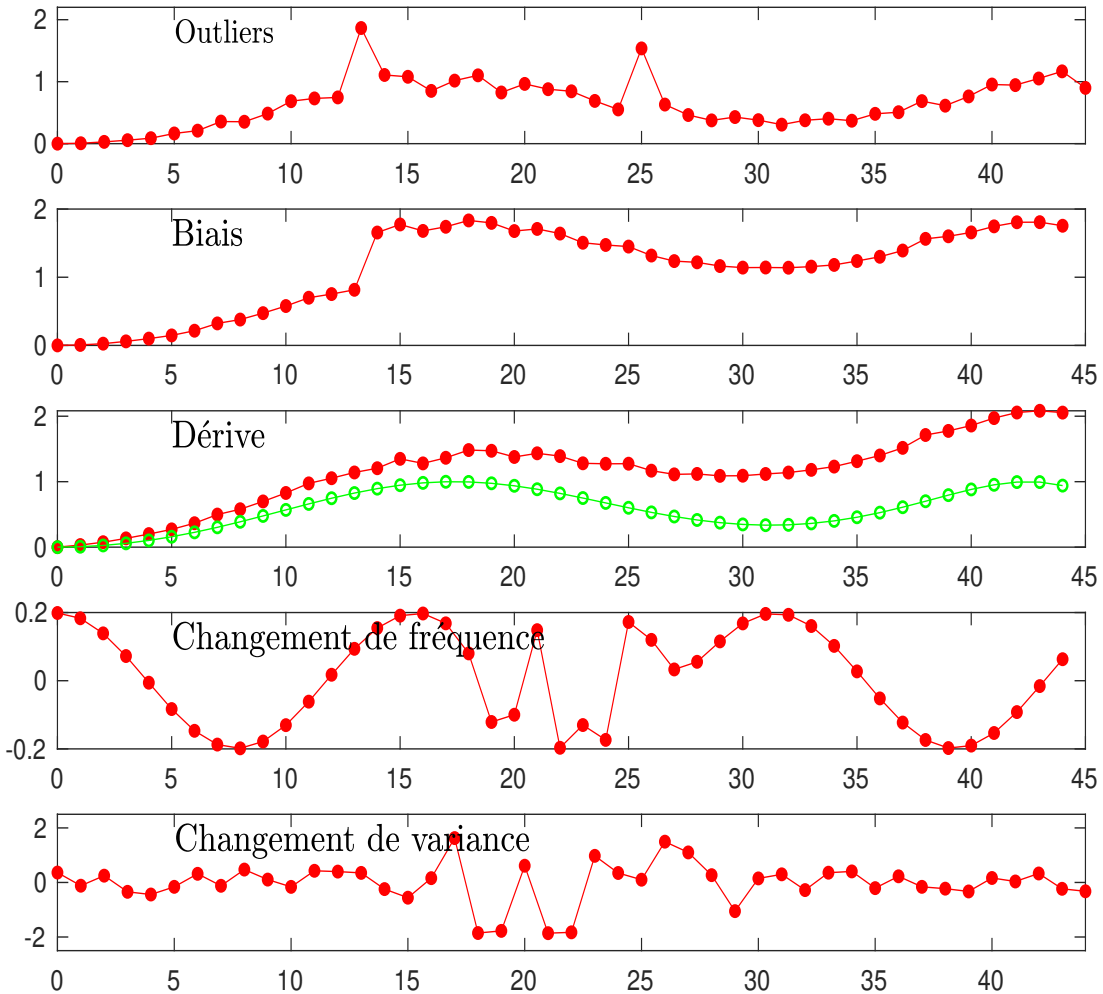


FIGURE – Fig 1. Différents type d'erreurs

1.3 Types de défauts de mesure



2. Méthodes

2.1 Détection de valeurs extrêmes

- Un exemple simpliste

$$\begin{bmatrix} 6.9 & 7.1 & 6.6 & 6.5 & 2.1 & 6.2 & 6.25 & 6.5 & 6.8 & 6.9 & 7.0 \end{bmatrix}$$

- Un exemple moins évident

$$\begin{bmatrix} 4.4 & 6.2 & 6.25 & 6.5 & 6.8 & 6.9 & 7.0 \end{bmatrix}$$

- Test de Dixon

$$R = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$$

$R = 0.69$. La valeur critique pour un niveau de confiance de 95% avec 7 observations est de 0.526. Comme R est supérieure à ce niveau de confiance, on peut suspecter 4.4 comme valeur anormale avec une probabilté d'erreur de 5%.

- La formulation précédente pour la suspicion de la valeur la plus faible comme anormale s'applique bien évidemment à la valeur la plus grande. Pour cela il suffit de considérer le rapport $R = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$
- Beaucoup d'autres tests
  Dixon, Grubbs, Cochran, Tukey, Chauvenet, Tietjen-Moore, Student, Thompson, Peirce, Rosner, Prescott ...

- Un exemple simpliste

$$\begin{bmatrix} 6.9 & 7.1 & 6.6 & 6.5 & 2.1 & 6.2 & 6.25 & 6.5 & 6.8 & 6.9 & 7.0 \end{bmatrix}$$

- Un exemple moins évident

$$\begin{bmatrix} 4.4 & 6.2 & 6.25 & 6.5 & 6.8 & 6.9 & 7.0 \end{bmatrix}$$

- Test de Dixon

$$\boxed{R = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}}$$

$R = 0.69$. La valeur critique pour un niveau de confiance de 95% avec 7 observations est de 0.526. Comme R est supérieure à ce niveau de confiance, on peut suspecter 4.4 comme valeur anormale avec une probabilté d'erreur de 5%.

- La formulation précédente pour la suspicion de la valeur la plus faible comme anormale s'applique bien évidemment à la valeur la plus grande. Pour cela il suffit de considérer le rapport $R = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$
- Beaucoup d'autres tests
  Dixon, Grubbs, Cochran, Tukey, Chauvenet, Tietjen-Moore, Student, Thompson, Peirce, Rosner, Prescott ...

- Un exemple simpliste

$$\begin{bmatrix} 6.9 & 7.1 & 6.6 & 6.5 & 2.1 & 6.2 & 6.25 & 6.5 & 6.8 & 6.9 & 7.0 \end{bmatrix}$$

- Un exemple moins évident

$$\begin{bmatrix} 4.4 & 6.2 & 6.25 & 6.5 & 6.8 & 6.9 & 7.0 \end{bmatrix}$$

- Test de Dixon

$$\boxed{R = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}}$$

$R = 0.69$. La valeur critique pour un niveau de confiance de 95% avec 7 observations est de 0.526. Comme R est supérieure à ce niveau de confiance, on peut suspecter 4.4 comme valeur anormale avec une probabilté d'erreur de 5%.

- La formulation précédente pour la suspicion de la valeur la plus faible comme anormale s'applique bien évidemment à la valeur la plus grande. Pour cela il suffit de considérer le rapport $R = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$
- Beaucoup d'autres tests
  Dixon, Grubbs, Cochran, Tukey, Chauvenet, Tietjen-Moore, Student, Thompson, Peirce, Rosner, Prescott ...

- Un exemple simpliste

$$\begin{bmatrix} 6.9 & 7.1 & 6.6 & 6.5 & 2.1 & 6.2 & 6.25 & 6.5 & 6.8 & 6.9 & 7.0 \end{bmatrix}$$

- Un exemple moins évident

$$\begin{bmatrix} 4.4 & 6.2 & 6.25 & 6.5 & 6.8 & 6.9 & 7.0 \end{bmatrix}$$

- Test de Dixon

$$\boxed{R = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}}$$

$R = 0.69$. La valeur critique pour un niveau de confiance de 95% avec 7 observations est de 0.526. Comme R est supérieure à ce niveau de confiance, on peut suspecter 4.4 comme valeur anormale avec une probabilté d'erreur de 5%.

- La formulation précédente pour la suspicion de la valeur la plus faible comme anormale s'applique bien évidemment à la valeur la plus grande. Pour cela il suffit de considérer le rapport $R = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$
- Beaucoup d'autres tests
  Dixon, Grubbs, Cochran, Tukey, Chauvenet, Tietjen-Moore, Student, Thompson, Peirce, Rosner, Prescott ...

- Système caractérisé par quatre variables liées par le modèle :

$$\begin{cases} x_1^2 - x_2 + 2\log x_3 &= 0 \\ x_2 + x_3 - x_4 &= 0 \end{cases}$$

x_1	0.94	1.87	1.66	2.13	1.82	1.47	1.60	1.85	1.82	1.50	1.50	1.55	1.20	0.88	1.35
x_2	0.61	1.47	2.00	2.16	2.07	1.79	1.47	1.17	1.66	0.67	0.50	0.36	0.26	0.18	0.12
x_3	0.87	0.35	0.69	0.29	0.53	1.33	0.60	0.33	0.30	0.45	0.42	0.36	0.56	0.74	0.43
x_4	1.49	1.82	2.69	2.45	2.59	2.62	2.07	1.51	1.20	1.13	0.92	0.72	0.81	0.92	0.55

TABLE – Mesures disponibles au cours du temps

- Résidus de modèles

$$\begin{aligned} r_1 &= x_1^2 - x_2 + 2\log x_3 \\ r_2 &= x_2 + x_3 - x_4 \\ r_3 &= x_1^2 + 2\log x_3 + x_3 - x_4 \end{aligned}$$

r_1	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	1.09	0.01	0.00	0.71	0.02	0.08	0.02	0.02	0.01	0.00
r_2	0.00	0.01	0.02	0.04	0.02	0.50	0.03	0.01	0.75	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
r_3	0.01	0.03	0.03	0.05	0.03	1.58	0.03	0.01	0.05	0.01	0.07	0.02	0.03	0.02	0.00

TABLE – Résidus indicateurs de défauts

- Interprétation des résidus : détection/localisation valeurs aberrantes

- Système caractérisé par quatre variables liées par le modèle :

$$\begin{cases} x_1^2 - x_2 + 2\log x_3 &= 0 \\ x_2 + x_3 - x_4 &= 0 \end{cases}$$

x_1	0.94	1.87	1.66	2.13	1.82	1.47	1.60	1.85	1.82	1.50	1.50	1.55	1.20	0.88	1.35
x_2	0.61	1.47	2.00	2.16	2.07	1.79	1.47	1.17	1.66	0.67	0.50	0.36	0.26	0.18	0.12
x_3	0.87	0.35	0.69	0.29	0.53	1.33	0.60	0.33	0.30	0.45	0.42	0.36	0.56	0.74	0.43
x_4	1.49	1.82	2.69	2.45	2.59	2.62	2.07	1.51	1.20	1.13	0.92	0.72	0.81	0.92	0.55

TABLE – Mesures disponibles au cours du temps

- Résidus de modèles

$$\begin{aligned} r_1 &= x_1^2 - x_2 + 2\log x_3 \\ r_2 &= x_2 + x_3 - x_4 \\ r_3 &= x_1^2 + 2\log x_3 + x_3 - x_4 \end{aligned}$$

$\lvert r_1 \rvert$	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	1.09	0.01	0.00	0.71	0.02	0.08	0.02	0.02	0.01	0.00
$\lvert r_2 \rvert$	0.00	0.01	0.02	0.04	0.02	0.50	0.03	0.01	0.75	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
$\lvert r_3 \rvert$	0.01	0.03	0.03	0.05	0.03	1.58	0.03	0.01	0.05	0.01	0.07	0.02	0.03	0.02	0.00

TABLE – Résidus indicateurs de défauts

- Interprétation des résidus : détection/localisation valeurs aberrantes

Quelques outils classiques pour la détection/isolation d'erreurs et la validation de données

- Analyse en composantes principales (PCA, GPCA, KPCA)
- Equilibrage de bilan matière et énergie
- Technique des sous-espaces
- Reconnaissance de formes
- Estimation d'état
- Estimation paramétrique

Points communs aux différentes approches

- Génération de signaux indicateurs de défauts
- Structuration de signaux indicateurs de défauts
- Test de rupture de signal

Quelques outils classiques pour la détection/isolation d'erreurs et la validation de données

- Analyse en composantes principales (PCA, GPCA, KPCA)
- Equilibrage de bilan matière et énergie
- Technique des sous-espaces
- Reconnaissance de formes
- Estimation d'état
- Estimation paramétrique

Points communs aux différentes approches

- Génération de signaux indicateurs de défauts
- Structuration de signaux indicateurs de défauts
- Test de rupture de signal

2.4 Démarche active : remplacement des valeurs aberrantes

- On cherche à éliminer et à remplacer les valeurs aberrantes dans un signal temporel avec une déformation "minimale" du signal utile.

- Moyenne winsorisée ou "rognée" d'ordre $\{r, s\}$
  Signal à filtrer : $\begin{bmatrix} x_{i-m} & x_{i-m+1} & \cdots & x_i & \cdots & x_{i+m-1} & x_{i+m} \end{bmatrix}$
  Valeur filtrée :

$$\hat{x}_i = \frac{1}{n}\left(r\, x_{i-m+r} + \sum_{j=-m+r}^{m-s} x_{i+j} + s\, x_{i+m-s}\right)$$

- Moyenne winsorisée à $2a\%$: remplacement d'un pourcentage $2a$ donné de valeurs des deux extrémités des données. Pour un filtre symétrique $r = s$, on a :

$$\hat{x}_i = \frac{1}{(1-2a)n}\left((1-f)x_{i-m+r} + \sum_{j=-m+r+1}^{m-r-1} x_{i+j} + (1-f)x_{i+m-r}\right), \quad f = an - r$$

- Par exemple, avec $m = 4, a = 0.3, r = 2$, on obtient le filtre :

$$\hat{x}_i = \frac{1}{3.6}(0.3x_{i-2} + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + 0.3x_{i+2}), \qquad i > 3$$

2.4 Démarche active : remplacement des valeurs aberrantes

- On cherche à éliminer et à remplacer les valeurs aberrantes dans un signal temporel avec une déformation "minimale" du signal utile.

- Moyenne winsorisée ou "rognée" d'ordre $\{r, s\}$
  Signal à filtrer : $\begin{bmatrix} x_{i-m} & x_{i-m+1} & \cdots & x_i & \cdots & x_{i+m-1} & x_{i+m} \end{bmatrix}$
  Valeur filtrée :
$$\hat{x}_i = \frac{1}{n}\left(r\,x_{i-m+r} + \sum_{j=-m+r}^{m-s} x_{i+j} + s\,x_{i+m-s}\right)$$

- Moyenne winsorisée à $2a\%$: remplacement d'un pourcentage $2a$ donné de valeurs des deux extrémités des données. Pour un filtre symétrique $r = s$, on a :

$$\hat{x}_i = \frac{1}{(1-2a)n}\left((1-f)x_{i-m+r} + \sum_{j=-m+r+1}^{m-r-1} x_{i+j} + (1-f)x_{i+m-r}\right), \quad f = a\,n - r$$

- Par exemple, avec $m = 4, a = 0.3, r = 2$, on obtient le filtre :

$$\hat{x}_i = \frac{1}{3.6}(0.3x_{i-2} + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + 0.3x_{i+2}), \qquad i > 3$$

- On cherche à éliminer et à remplacer les valeurs aberrantes dans un signal temporel avec une déformation “minimale“ du signal utile.

- Moyenne winsorisée ou “rognée“ d'ordre $\{r, s\}$
  Signal à filtrer : $\begin{bmatrix} x_{i-m} & x_{i-m+1} & \cdots & x_i & \cdots & x_{i+m-1} & x_{i+m} \end{bmatrix}$
  Valeur filtrée :
$$\hat{x}_i = \frac{1}{n}\left(r\, x_{i-m+r} + \sum_{j=-m+r}^{m-s} x_{i+j} + s\, x_{i+m-s}\right)$$

- Moyenne winsorisée à $2a\%$: remplacement d'un pourcentage $2a$ donné de valeurs des deux extrémités des données. Pour un filtre symétrique $r = s$, on a :

$$\hat{x}_i = \frac{1}{(1-2a)n}\left((1-f)x_{i-m+r} + \sum_{j=-m+r+1}^{m-r-1} x_{i+j} + (1-f)x_{i+m-r}\right), \quad f = a\,n - r$$

- Par exemple, avec $m = 4, a = 0.3, r = 2$, on obtient le filtre :

$$\hat{x}_i = \frac{1}{3.6}(0.3x_{i-2} + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + 0.3x_{i+2}), \qquad i > 3$$

La figure suivante est une illustration du remplacement des valeurs aberrantes selon les techniques de trimming et de filtrage médian. Bien évidemment la largeur de fenêtre du filtre est le paramètre clef de ces techniques.

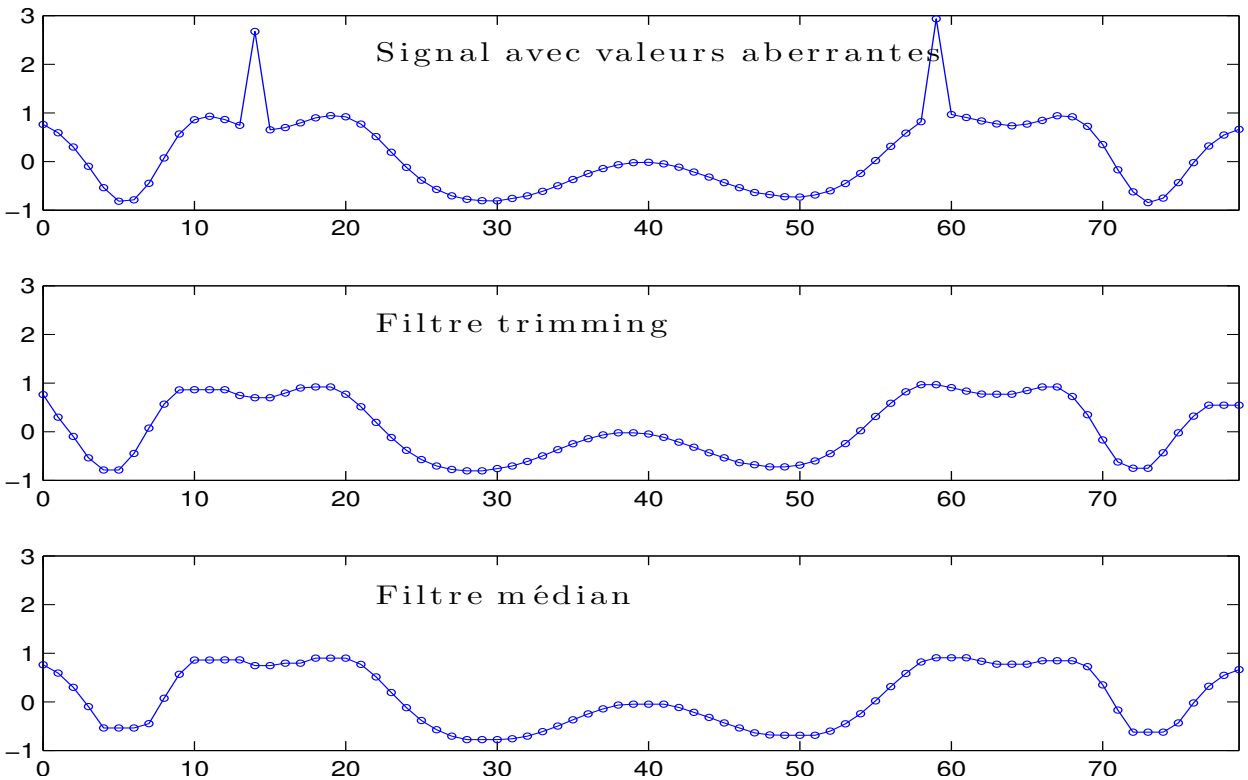


FIGURE – Fig. 3. Filtrage des valeurs aberrantes

3.1 - Démarche passive : acceptation des valeurs aberrantes et robustesse

- A l'encontre de la démarche précédente, on ne cherche pas ici à supprimer les valeurs aberrantes mais à réduire leurs effets indésirables lors de leur utilisation.

- A titre d'exemple bien connu, rappelons le cas de la moyenne robuste en utilisant le filtre médian qui permet d'éliminer l'influence des valeurs aberrantes sans chercher à en expliciter leur présence.

- Deux outils seront rappelés pour atteindre un certain niveau de robustesse dans les traitements :
  - les distributions contaminées
  - les M-estimateurs.

- Modèle dit contaminé
  Une grande partie μ des données est générée à partir d'un modèle classique à erreur normale. Les autres données (fraction $(1-\mu)$ de l'ensemble des N données), peuvent être affectées par un bruit anormal généré par une distribution de caractéristiques différentes :

$$p(\varepsilon) = \mu\ \mathcal{N}(0, \sigma_1^2) + (1-\mu)\ \mathcal{N}(0, \sigma_2^2)$$

- Cas de l'estimation de la moyenne m d'un échantillon de taille N en présence de valeurs aberrantes. La fonction de vraisemblance de cet échantillon s'explicite :

$$\begin{aligned} \mathscr{V} &= \prod_{i=1}^{N} (\mu p_{1,i} + (1-\mu) p_{2,i}) \\ p_{1,i} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} exp\left(-\frac{(x_i - m)^2}{2\sigma_1^2}\right) \\ p_{2,i} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} exp\left(-\frac{(x_i - m)^2}{2\sigma_2^2}\right) \end{aligned}$$

où σ_1, σ_2 les écart-types de la distribution contaminée. Le maximum de la fonction de vraisemblance par rapport à m est obtenu pour :

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{N} w_i(m)(x_i - m) = 0 \\ &w_i(m) = \mu \frac{p_{1,i}}{\sigma_1^2} + (1-\mu)\frac{p_{1,i}}{\sigma_2^2} \end{aligned}$$

- Modèle dit contaminé
  Une grande partie μ des données est générée à partir d'un modèle classique à erreur normale. Les autres données (fraction $(1-\mu)$ de l'ensemble des N données), peuvent être affectées par un bruit anormal généré par une distribution de caractéristiques différentes :

$$p(\varepsilon) = \mu\ \mathcal{N}(0, \sigma_1^2) + (1-\mu)\ \mathcal{N}(0, \sigma_2^2)$$

- Cas de l'estimation de la moyenne m d'un échantillon de taille N en présence de valeurs aberrantes. La fonction de vraisemblance de cet échantillon s'explicite :

$$\begin{aligned} \mathcal{V} &= \prod_{i=1}^{N} (\mu p_{1,i} + (1-\mu) p_{2,i}) \\ p_{1,i} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} exp\left(-\frac{(x_i - m)^2}{2\sigma_1^2}\right) \\ p_{2,i} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} exp\left(-\frac{(x_i - m)^2}{2\sigma_2^2}\right) \end{aligned}$$

où σ_1, σ_2 les écart-types de la distribution contaminée. Le maximum de la fonction de vraisemblance par rapport à m est obtenu pour :

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{N} w_i(m)(x_i - m) = 0 \\ &w_i(m) = \mu \frac{p_{1,i}}{\sigma_1^2} + (1-\mu)\frac{p_{1,i}}{\sigma_2^2} \end{aligned}$$

- Les M-estimateurs ont été introduits par P. Huber (1964) sous la forme d'une généralisation de l'estimation par maximum de vraisemblance à la minimisation d'une fonction ρ sur l'ensemble des données disponibles $z_k, k = 1, \ldots, N$. Ainsi, le M-estimateur associé aux données et à la fonction ρ est estimé par :

$$\hat{\theta} = \text{argmin}_\theta \left(\sum_{k=1}^{N} \rho(z_k, \theta) \right)$$

- Un exemple bien connu est la fonction de Cauchy ou de Lorenz :

$$\rho(x_k, y_k, a, b) = \frac{c^2}{2} \log \left(1 + \left(\frac{\varepsilon_k}{c} \right)^2 \right)$$

où $\varepsilon_k = y_k - a x_k - b$ est une image des erreurs de modèle lors de la représentation de données par une droite.

- La sensibilité de ρ vis-à-vis des erreurs ε s'explicite :

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_k} = \frac{\varepsilon_k}{1 + \left(\frac{\varepsilon_k}{c} \right)^2}$$

Ainsi une grande erreur, $\varepsilon >> c$, produit une sensibilité faible et une erreur faible, $\varepsilon << c$, donne une sensibilité de l'ordre de ε. Ainsi, le choix du seuil c conditionne la robustesse de l'estimateur vis-à-vis des erreurs aberrantes.

- Les M-estimateurs ont été introduits par P. Huber (1964) sous la forme d'une généralisation de l'estimation par maximum de vraisemblance à la minimisation d'une fonction ρ sur l'ensemble des données disponibles $z_k, k = 1, \ldots, N$. Ainsi, le M-estimateur associé aux données et à la fonction ρ est estimé par :

$$\hat{\theta} = \text{argmin}_\theta \left(\sum_{k=1}^{N} \rho(z_k, \theta) \right)$$

- Un exemple bien connu est la fonction de Cauchy ou de Lorenz :

$$\rho(x_k, y_k, a, b) = \frac{c^2}{2} \log \left(1 + \left(\frac{\varepsilon_k}{c} \right)^2 \right)$$

où $\varepsilon_k = y_k - a x_k - b$ est une image des erreurs de modèle lors de la représentation de données par une droite.

- La sensibilité de ρ vis-à-vis des erreurs ε s'explicite :

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_k} = \frac{\varepsilon_k}{1 + \left(\frac{\varepsilon_k}{c} \right)^2}$$

Ainsi une grande erreur, $\varepsilon >> c$, produit une sensibilité faible et une erreur faible, $\varepsilon << c$, donne une sensibilité de l'ordre de ε. Ainsi, le choix du seuil c conditionne la robustesse de l'estimateur vis-à-vis des erreurs aberrantes.

- Les M-estimateurs ont été introduits par P. Huber (1964) sous la forme d'une généralisation de l'estimation par maximum de vraisemblance à la minimisation d'une fonction ρ sur l'ensemble des données disponibles $z_k, k = 1, \ldots, N$. Ainsi, le M-estimateur associé aux données et à la fonction ρ est estimé par :

$$\hat{\theta} = \text{argmin}_\theta \left(\sum_{k=1}^{N} \rho(z_k, \theta) \right)$$

- Un exemple bien connu est la fonction de Cauchy ou de Lorenz :

$$\rho(x_k, y_k, a, b) = \frac{c^2}{2} \log \left(1 + \left(\frac{\varepsilon_k}{c} \right)^2 \right)$$

où $\varepsilon_k = y_k - a x_k - b$ est une image des erreurs de modèle lors de la représentation de données par une droite.

- La sensibilité de ρ vis-à-vis des erreurs ε s'explicite :

$$\frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_k} = \frac{\varepsilon_k}{1 + \left(\frac{\varepsilon_k}{c} \right)^2}$$

Ainsi une grande erreur, $\varepsilon >> c$, produit une sensibilité faible et une erreur faible, $\varepsilon << c$, donne une sensibilité de l'ordre de ε. Ainsi, le choix du seuil c conditionne la robustesse de l'estimateur vis-à-vis des erreurs aberrantes.

A partir des équations précédentes on peut établir les équations d'optimalité des paramètres a et b du modèle de régression :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{N} w_k(a,b)(y_k - ax_k - b)x_k &= 0 \\ \sum_{k=1}^{N} w_k(a,b)(y_k - ax_k - b) &= 0 \end{cases}$$

avec les poids :

$$w_k(a,b) = \frac{1}{1 + \left(\frac{y_k - ax_k - b}{c}\right)^2}$$

Le graphe de gauche montre la disposition de 20 couples de points $\{x_i, y_i\}$ dont deux sont visiblement aberrants.

Le graphe de droite indique les droites de régression obtenues par une régression ordinaire (tracé en rouge) et une régression robuste (tracé en bleu).

Les paramètres vrais a et b du système sont 1 et 0.5
ceux obtenus par moindres carrés ordinaires 1.171 et 0.608
ceux issus de la procédure robuste étant 1.089 et 0.506.

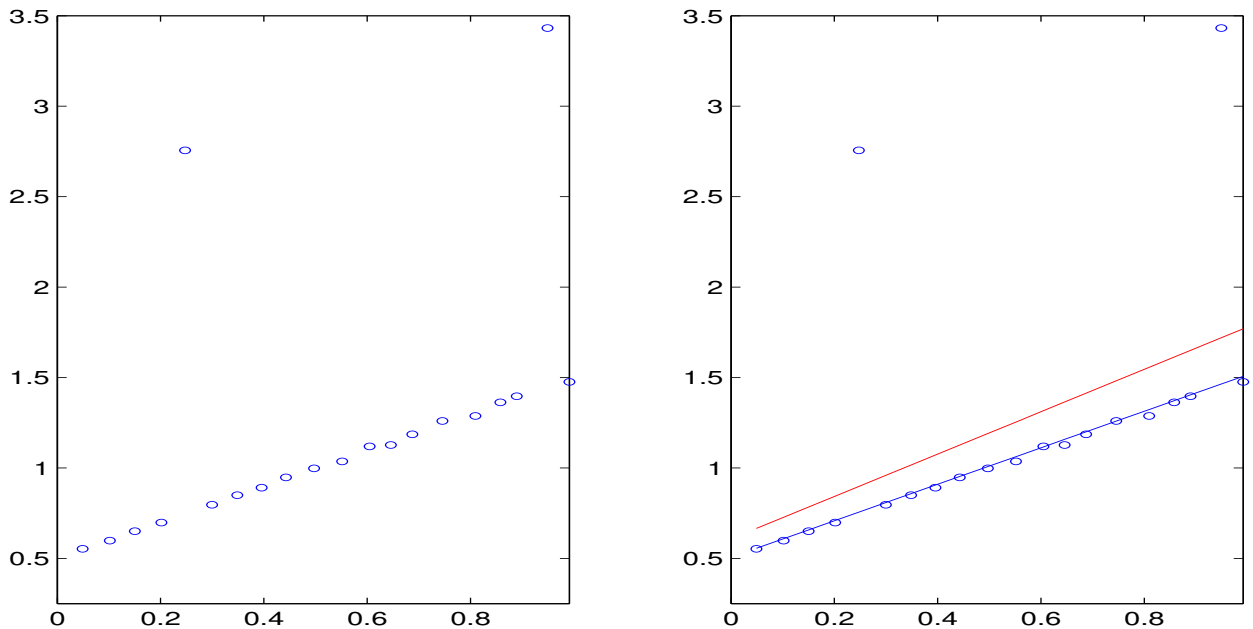


FIGURE – Figure 5. Régression robuste

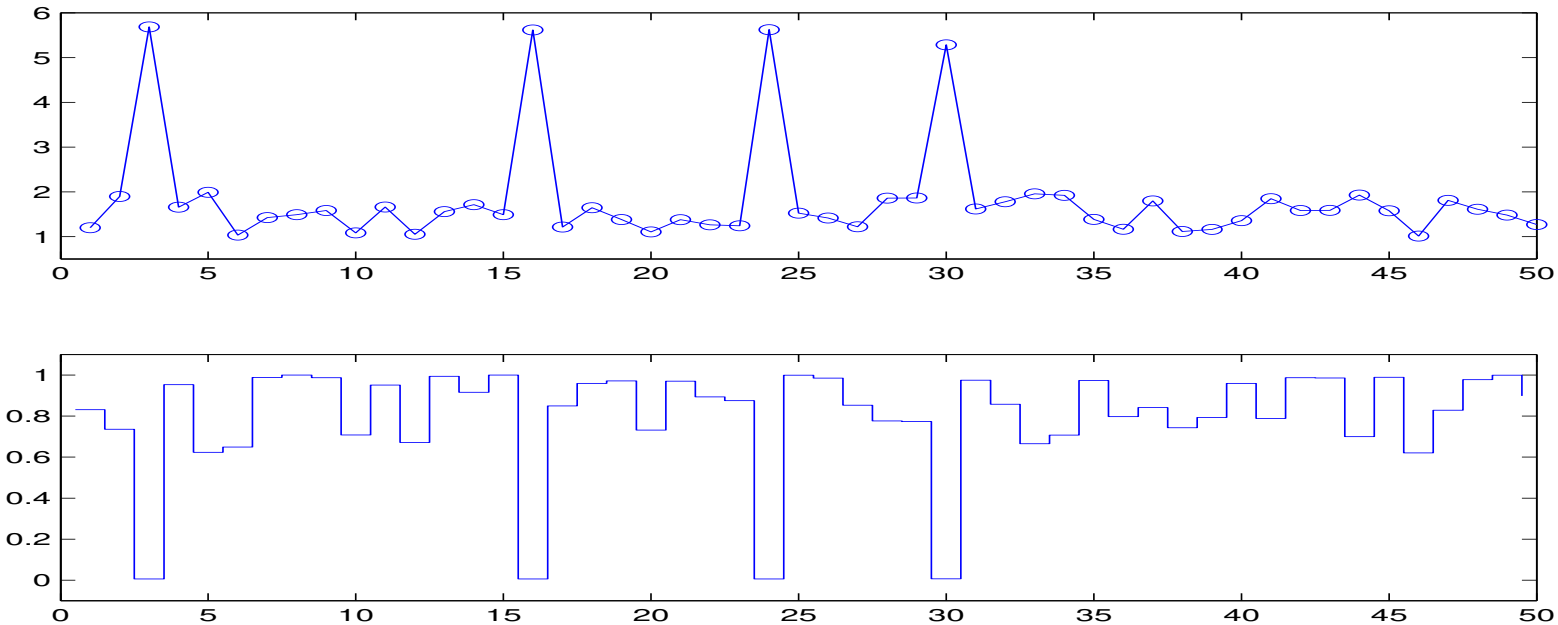


FIGURE – Fig. 4. Données avec valeurs aberrantes et poids estimés

	Moyenne	Ecart-type
sans val.aberr. Evaluation standard	1.501	0.277
avec val.aberr. Evaluation standard	1.821	1.145
avec val. aberr. Evaluation robuste	1.501	0.282

Table 5. Estimation robuste d'une moyenne et d'un écart type

3. Une méthode sans modèle a priori pour la détection de valeurs aberrantes : ACP robuste

- Evaluer la matrice des variances et covariances expérimentales des données centrées :

$$\Sigma = X^T \left(I - \frac{UU^T}{U^T U} \right) X$$

U, le vecteur de dimension N dont toutes les composantes sont égales à 1.

- Résoudre par rapport à P et Λ l'équation :

$$\Sigma P = P\Lambda$$

$P \in \mathscr{R}^{n.n}$: matrice des vecteurs propres normalisés p_i de Σ
$\Lambda \in \mathscr{R}^{n.n}$ matrice, diagonale, de ses valeurs propres λ_i.

- On peut également montrer que :

$$X = TP^T \quad T = XP \qquad \rightarrow \qquad X = XPP^T \quad !!!$$

- Reconstruction dans un espace de représentation de dimension réduite

$$\begin{cases} \hat{X} &= X\hat{P}^\ell \hat{P}^{\ell T} \\ \tilde{X} &= X(I - \hat{P}^\ell \hat{P}^{\ell T}) \end{cases}$$

3.2 - Méthodes sans modèle a priori : Analyse en Composantes Principales Robuste

- Difficulté majeure de l'*ACP* : sensibilité aux valeurs aberrantes.
- Matrice de variances et covariances "locale" : sa forme tend à privilégier la contribution d'observations proches au détriment d'observations éloignées dues à la présence de valeurs aberrantes.

$$\Sigma^r = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} w_{i,j}(x_i - x_j)(x_i - x_j)^T}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} w_{i,j}}$$

$$w_{i,j} = \exp\left(-\frac{\beta}{2}(x_i - x_j)^T V^{-1}(x_i - x_j)\right)$$

β : paramètre à régler pour réduire l'influence des observations éloignées.

- Difficulté majeure de l'*ACP* : sensibilité aux valeurs aberrantes.
- Matrice de variances et covariances "locale" : sa forme tend à privilégier la contribution d'observations proches au détriment d'observations éloignées dues à la présence de valeurs aberrantes.

$$\Sigma^r = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} w_{i,j}(x_i - x_j)(x_i - x_j)^T}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} w_{i,j}}$$

$$w_{i,j} = \exp\left(-\frac{\beta}{2}(x_i - x_j)^T V^{-1}(x_i - x_j)\right)$$

β : paramètre à régler pour réduire l'influence des observations éloignées.

- Traitement d'une nouvelle mesure : estimation

$$x = \hat{x} + \tilde{x} \tag{1a}$$

$$\boxed{\hat{x} = C^{(\ell)} x \qquad \tilde{x} = (I - C^{(\ell)}) x} \qquad C^{(\ell)} = \hat{P}\hat{P}^T \tag{1b}$$

- Reconstruction partielle
  A partir de (1b), cherchons à estimer la r-ième. composante du vecteur x. Avec c_{ij} les éléments de la matrice $C^{(\ell)}$, la r-ième composante de $\hat{x}$ (1b) s'explicite :

$$z_r = \sum_{j=1, j\neq r}^{n} c_{rj} x_j + c_{rr} x_r \tag{2}$$

- Afin de ne pas utiliser la r-ième composante x_r de la mesure x, on remplace dans le membre de droite de l'équation (2) x_r par $\hat{z}_r$, ce qui donne :

$$\boxed{\hat{z}_r = \frac{\begin{pmatrix} c_{-r}^T & 0 & c_{+r}^T \end{pmatrix}}{1 - c_{rr}} x}$$

  où les indices $-r$ and $+r$ sont respectivement utilisés pour construire un vecteur formé par les $r-1$ premiers et les $n-r$ derniers éléments du vecteur c_r.
  Cette reconstruction partielle du vecteur de mesure est notée :

$$\hat{x}_r^{(\ell)} = \begin{pmatrix} x_{-r}^T & \hat{z}_r & x_{+r}^T \end{pmatrix}^T$$

- Traitement d'une nouvelle mesure : estimation

$$x = \hat{x} + \tilde{x} \tag{1a}$$

$$\boxed{\hat{x} = C^{(\ell)} x \qquad \tilde{x} = (I - C^{(\ell)}) x} \qquad C^{(\ell)} = \hat{P}\hat{P}^T \tag{1b}$$

- Reconstruction partielle
  A partir de (1b), cherchons à estimer la r-ième. composante du vecteur x. Avec c_{ij} les éléments de la matrice $C^{(\ell)}$, la r-ième composante de $\hat{x}$ (1b) s'explicite :

$$z_r = \sum_{j=1, j\neq r}^{n} c_{rj} x_j + c_{rr} x_r \tag{2}$$

- Afin de ne pas utiliser la r-ième composante x_r de la mesure x, on remplace dans le membre de droite de l'équation (2) x_r par $\hat{z}_r$, ce qui donne :

$$\boxed{\hat{z}_r = \frac{\begin{pmatrix} c_{-r}^T & 0 & c_{+r}^T \end{pmatrix}}{1 - c_{rr}} x}$$

où les indices $-r$ and $+r$ sont respectivement utilisés pour construire un vecteur formé par les $r-1$ premiers et les $n-r$ derniers éléments du vecteur c_r.
Cette reconstruction partielle du vecteur de mesure est notée :

$$\hat{x}_r^{(\ell)} = \begin{pmatrix} x_{-r}^T & \hat{z}_r & x_{+r}^T \end{pmatrix}^T$$

- Traitement d'une nouvelle mesure : estimation

$$x = \hat{x} + \tilde{x} \tag{1a}$$

$$\boxed{\hat{x} = C^{(\ell)} x \qquad \tilde{x} = (I - C^{(\ell)}) x} \qquad C^{(\ell)} = \hat{P}\hat{P}^T \tag{1b}$$

- Reconstruction partielle
  A partir de (1b), cherchons à estimer la r-ième. composante du vecteur x. Avec c_{ij} les éléments de la matrice $C^{(\ell)}$, la r-ième composante de $\hat{x}$ (1b) s'explicite :

$$z_r = \sum_{j=1, j\neq r}^{n} c_{rj} x_j + c_{rr} x_r \tag{2}$$

- Afin de ne pas utiliser la r-ième composante x_r de la mesure x, on remplace dans le membre de droite de l'équation (2) x_r par $\hat{z}_r$, ce qui donne :

$$\boxed{\hat{z}_r = \frac{\begin{pmatrix} c_{-r}^T & 0 & c_{+r}^T \end{pmatrix}}{1 - c_{rr}} x}$$

  où les indices $-r$ and $+r$ sont respectivement utilisés pour construire un vecteur formé par les $r-1$ premiers et les $n-r$ derniers éléments du vecteur c_r.
  Cette reconstruction partielle du vecteur de mesure est notée :

$$\hat{x}_r^{(\ell)} = \begin{pmatrix} x_{-r}^T & \hat{z}_r & x_{+r}^T \end{pmatrix}^T$$

- Projection des reconstructions dans l'espace résiduel $\rightarrow$ Indicateurs de défauts

$$\begin{aligned} \tilde{x}_r^{(\ell)} &= (I - C^{(\ell)})\hat{x}_r^{(\ell)} \qquad r = 1, \ldots, n \qquad C^{(\ell)} = \hat{P}^{\ell}\hat{P}^{\ell T} \\ &= P^{\ell} x \qquad P^{\ell} = (I - C^{(\ell)}) \left(I + \frac{\xi_r \xi_r^T C^{(\ell)}}{1 - \xi_r^T C^{(\ell)} \xi_r} \right) (I - \xi_r \xi_r^T) \end{aligned}$$

ξ_r est le vecteur nul excepté sa r-ième composante égale à l'unité

- Propriétés de la matrice P^{ℓ}
  - La $r^{ième}$ colonne de la matrice $P_r^{(\ell)}$ ont toutes leurs composantes nulles.
  - La $r^{ième}$ ligne de la matrice $P_r^{(\ell)}$ ont toutes leurs composantes nulles.

- Conséquence pour la détection de défaut de mesure

$$x = x^* + \varepsilon + \xi_f d$$

Compte tenu de la structure de $P_r^{(\ell)}$:

- si la $r^{ième}$ composante de la mesure x est entachée de défaut, alors le résidu $\tilde{x}_r^{(\ell)}$ n'est pas influencé par le défaut.
- si la $p^{ième}$ $(p \neq r)$composante de la mesure x est entachée de défaut, alors le résidu $\tilde{x}_r^{(\ell)}$ est influencé par le défaut.

- Projection des reconstructions dans l'espace résiduel $\rightarrow$ Indicateurs de défauts

$$\begin{aligned} \tilde{x}_r^{(\ell)} &= (I - C^{(\ell)})\hat{x}_r^{(\ell)} \qquad r = 1, \ldots, n \qquad C^{(\ell)} = \hat{P}^{\ell}\hat{P}^{\ell T} \\ &= P^{\ell} x \qquad P^{\ell} = (I - C^{(\ell)}) \left(I + \frac{\xi_r \xi_r^T C^{(\ell)}}{1 - \xi_r^T C^{(\ell)} \xi_r} \right) (I - \xi_r \xi_r^T) \end{aligned}$$

ξ_r est le vecteur nul excepté sa r-ième composante égale à l'unité

- Propriétés de la matrice P^{ℓ}
  - La $r^{ième}$ colonne de la matrice $P_r^{(\ell)}$ ont toutes leurs composantes nulles.
  - La $r^{ième}$ ligne de la matrice $P_r^{(\ell)}$ ont toutes leurs composantes nulles.

- Conséquence pour la détection de défaut de mesure

$$x = x^* + \varepsilon + \xi_f d$$

Compte tenu de la structure de $P_r^{(\ell)}$:

- si la $r^{ième}$ composante de la mesure x est entachée de défaut, alors le résidu $\tilde{x}_r^{(\ell)}$ n'est pas influencé par le défaut.
- si la $p^{ième}$ $(p \neq r)$composante de la mesure x est entachée de défaut, alors le résidu $\tilde{x}_r^{(\ell)}$ est influencé par le défaut.

- Projection des reconstructions dans l'espace résiduel $\rightarrow$ Indicateurs de défauts

$$\begin{aligned} \tilde{x}_r^{(\ell)} &= (I - C^{(\ell)})\hat{x}_r^{(\ell)} \qquad r = 1, \ldots, n \qquad C^{(\ell)} = \hat{P}^{\ell}\hat{P}^{\ell T} \\ &= P^{\ell} x \qquad P^{\ell} = (I - C^{(\ell)}) \left(I + \frac{\xi_r \xi_r^T C^{(\ell)}}{1 - \xi_r^T C^{(\ell)} \xi_r} \right) (I - \xi_r \xi_r^T) \end{aligned}$$

ξ_r est le vecteur nul excepté sa r-ième composante égale à l'unité

- Propriétés de la matrice P^{ℓ}
  - La $r^{ième}$ colonne de la matrice $P_r^{(\ell)}$ ont toutes leurs composantes nulles.
  - La $r^{ième}$ ligne de la matrice $P_r^{(\ell)}$ ont toutes leurs composantes nulles.

- Conséquence pour la détection de défaut de mesure

$$x = x^* + \varepsilon + \xi_f d$$

Compte tenu de la structure de $P_r^{(\ell)}$:

- si la $r^{ième}$ composante de la mesure x est entachée de défaut, alors le résidu $\tilde{x}_r^{(\ell)}$ n'est pas influencé par le défaut.
- si la $p^{ième}$ $(p \neq r)$composante de la mesure x est entachée de défaut, alors le résidu $\tilde{x}_r^{(\ell)}$ est influencé par le défaut.

- Exemple simple : quatre variables (x_1, x_2, x_3 et x_4) et deux modèles.
  La matrice X des données comporte $N = 240$ mesures :

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & x_{1,4} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,4} \\ \cdots & & & \\ x_N & x_{N,2} & x_{N,3} & x_{N,4} \end{pmatrix}$$

  définies de la façon suivante :

$$x_{i,1} = v_i^2 + 1 + \sin(0.1i), \quad v_i \sim \mathcal{N}(0,1)$$
$$x_{i,2} = x_{i,1}, \quad x_{i,3} = -2x_{i,1}, \quad x_{i,4} \sim \mathcal{N}(0,1)$$

- A ces quatre variables sont ajoutées des réalisations de variables distribuées selon des lois normales centrées de même écart-type égal à 0.02.
  De façon simpliste, on peut considérer que le processus en question comporte une entrée (x_1) et deux sorties (x_2, x_3).
- Valeurs aberrantes (amplitudes 0.3) affectant les variables x_1, x_2 et x_3 :
  de 24 à 44 pour x_1
  de 80 à 100 pour x_2
  de 140 à 160 pour x_3.

- Exemple simple : quatre variables (x_1, x_2, x_3 et x_4) et deux modèles.
  La matrice X des données comporte $N = 240$ mesures :

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & x_{1,4} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,4} \\ \cdots & & & \\ x_N & x_{N,2} & x_{N,3} & x_{N,4} \end{pmatrix}$$

  définies de la façon suivante :

$$x_{i,1} = v_i^2 + 1 + \sin(0.1i), \quad v_i \sim \mathcal{N}(0,1)$$
$$x_{i,2} = x_{i,1}, \quad x_{i,3} = -2x_{i,1}, \quad x_{i,4} \sim \mathcal{N}(0,1)$$

- A ces quatre variables sont ajoutées des réalisations de variables distribuées selon des lois normales centrées de même écart-type égal à 0.02.
  De façon simpliste, on peut considérer que le processus en question comporte une entrée (x_1) et deux sorties (x_2, x_3).
- Valeurs aberrantes (amplitudes 0.3) affectant les variables x_1, x_2 et x_3 :
  de 24 à 44 pour x_1
  de 80 à 100 pour x_2
  de 140 à 160 pour x_3.

- Exemple simple : quatre variables (x_1, x_2, x_3 et x_4) et deux modèles.
  La matrice X des données comporte $N = 240$ mesures :

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & x_{1,4} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & x_{2,4} \\ \cdots & & & \\ x_N & x_{N,2} & x_{N,3} & x_{N,4} \end{pmatrix}$$

  définies de la façon suivante :

$$x_{i,1} = v_i^2 + 1 + \sin(0.1i), \quad v_i \sim \mathcal{N}(0,1)$$
$$x_{i,2} = x_{i,1}, \quad x_{i,3} = -2x_{i,1}, \quad x_{i,4} \sim \mathcal{N}(0,1)$$

- A ces quatre variables sont ajoutées des réalisations de variables distribuées selon des lois normales centrées de même écart-type égal à 0.02.
  De façon simpliste, on peut considérer que le processus en question comporte une entrée (x_1) et deux sorties (x_2, x_3).
- Valeurs aberrantes (amplitudes 0.3) affectant les variables x_1, x_2 et x_3 :
  de 24 à 44 pour x_1
  de 80 à 100 pour x_2
  de 140 à 160 pour x_3.

La figure suivante montre l'évolution des variables centrées par leurs moyennes respectives. L'objectif est de les détecter et surtout de les localiser.

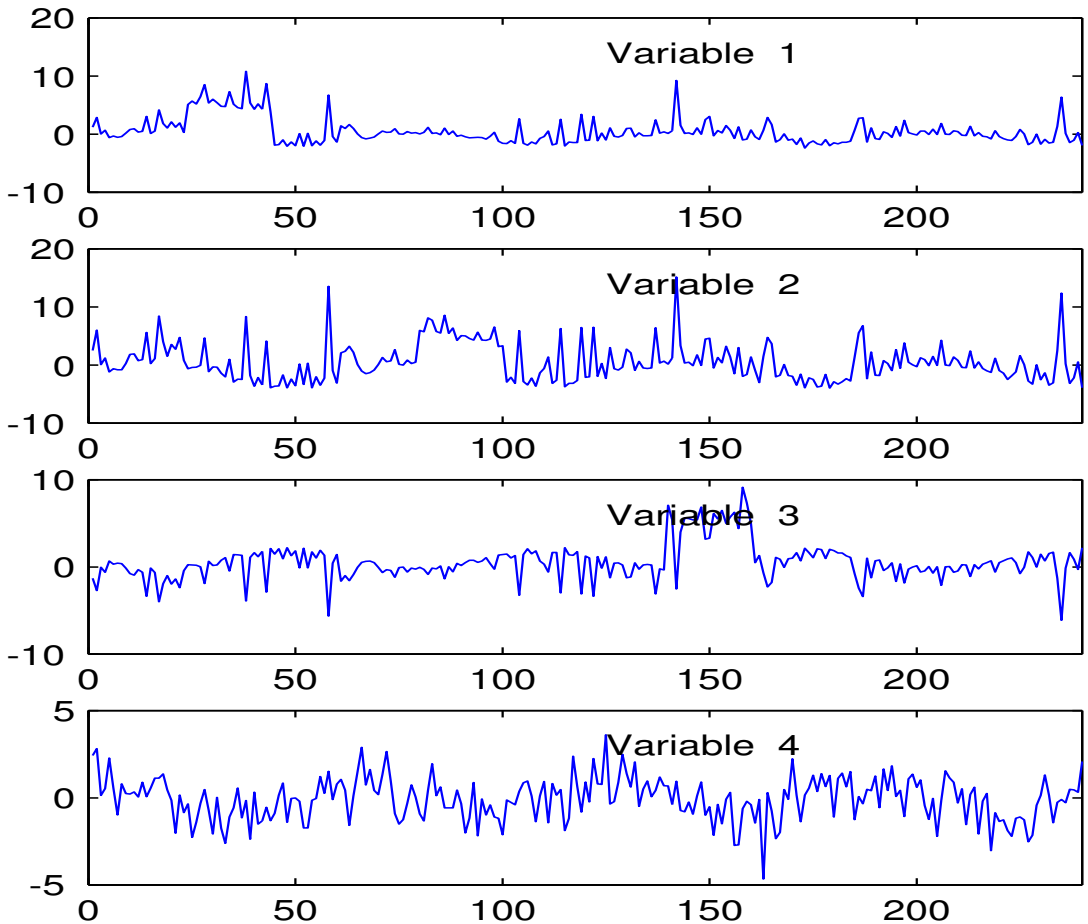


FIGURE – Figure 9. Données

3.7 - Méthodes sans modèle a priori : Analyse en Composantes Principales

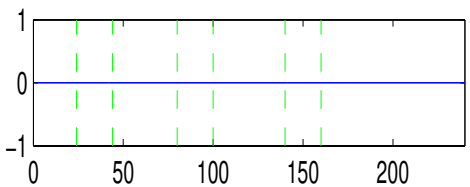
- ACP calculée avec les valeurs aberrantes
- Matrice de variance-covariance robuste
- Deux composantes principales retenues
- Reconstruction des variables une à une
- Projection des erreurs de reconstruction

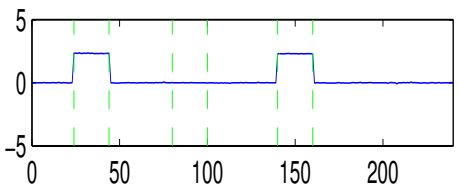
Valeurs aberrantes sur x_1, x_2 et x_3 :
de 24 à 44 pour x_1
de 80 à 100 pour x_2
de 140 à 160 pour x_3.

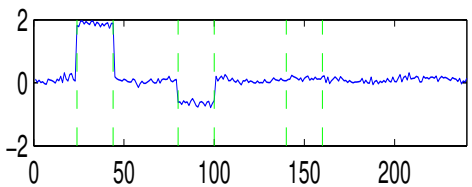
3 Reconstructions

Sans utiliser x_1 | Sans utiliser x_2 | Sans utiliser x_3

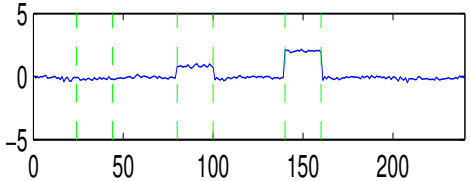
Proj $\tilde{x}_1$

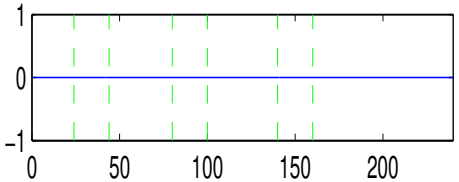


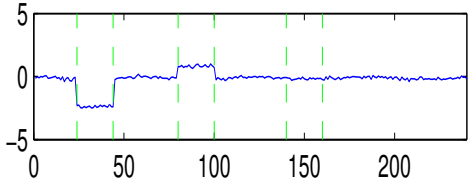




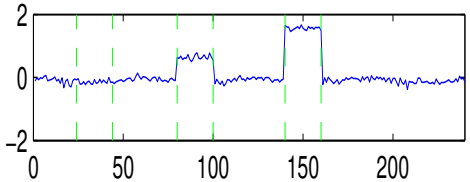
Proj $\tilde{x}_2$

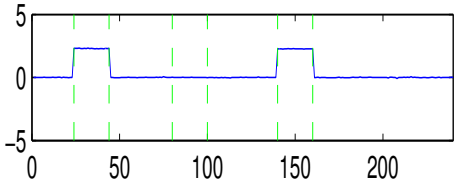


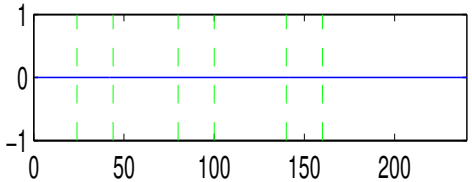




Proj $\tilde{x}_3$







3.7 - Méthodes sans modèle a priori : Analyse en Composantes Principales

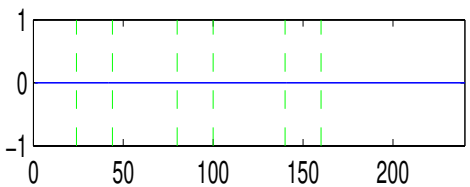
- ACP calculée avec les valeurs aberrantes
- Matrice de variance-covariance robuste
- Deux composantes principales retenues
- Reconstruction des variables une à une
- Projection des erreurs de reconstruction

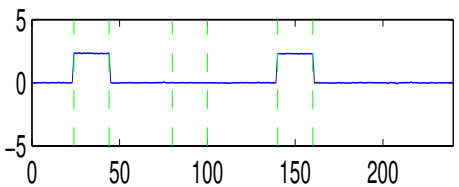
Valeurs aberrantes sur x_1, x_2 et x_3 :
de 24 à 44 pour x_1
de 80 à 100 pour x_2
de 140 à 160 pour x_3.

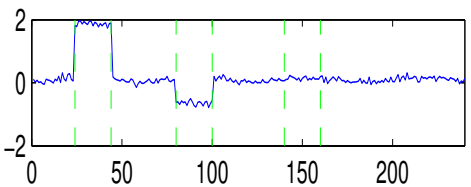
3 Reconstructions

Sans utiliser x_1 | Sans utiliser x_2 | Sans utiliser x_3

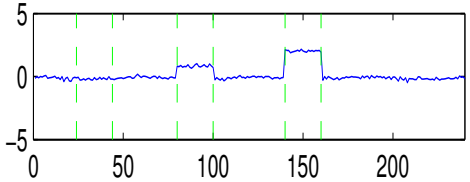
Proj $\tilde{x}_1$

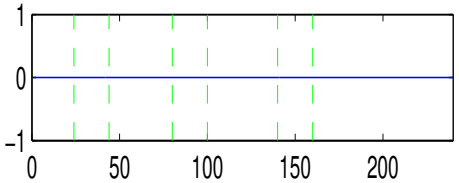


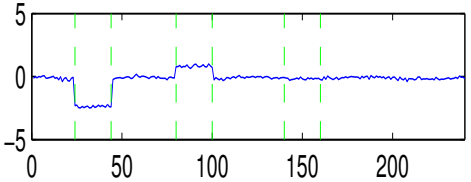




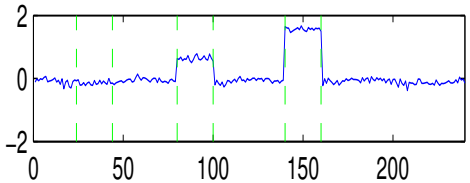
Proj $\tilde{x}_2$

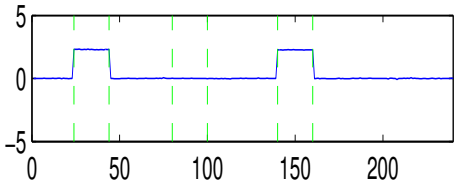


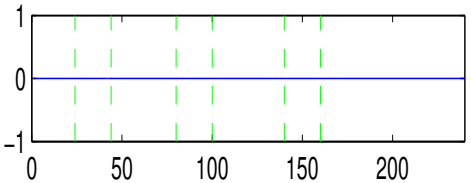




Proj $\tilde{x}_3$







Quelques extensions

- Systèmes en régime dynamique
- Systèmes à fonctionnement non linéaire
- Systèmes à plusieurs modes de fonctionnement

4. Référencess

4.1 - Quelques applications industrielles

Absorption refrigeration systems	Maradiaga et al. (2013)
Beverage alcohol distillation plant	Schladt and Hu (2007)
Chemical extraction plant	Holly et al. (1989)
Ethylene and ammonia plant	Placido, Loureiro (1998)
Exxon chemical process	Soderstrom et al. (2000)
Gas pipeline systems	Bagajewicz, Cabrera (2003)
Gases network in an iron and steel making plant	YI, Han (2004)
Hydrogen plant	Sarabia et al. (2012)
Industrial coke-oven-gas purification process	Hu and Shao (2006)
Industrial distillation column	Keller et al. (2012)
Industrial ETBE reactor	Domingues et al. (2012)
Industrial furnace	Eksteen et al. (2002)
Industrial hydrometallurgical plants for gold extraction	De Andradelima (2006)
Industrial polymerization reactor	Prata et al. (2010)
Industrial synthesis gas for production of ammonia	Christiansen et al. (1997)
Industrial utility plant	Lee et al. (1998)
Methyl terc-butyl ether plant	Al-Arfaj (2006)
Mineral and metallurgical plants	Vasebi et al (2012)
Nuclear power reactor	Valdetaro (2011)
Refinery	Zhang et al. (2001)
Sulfuric acid plant	Ozyurt and Pike (2004)
Turbine cycle of a boiling water reactor	Sunde and Berg (2003)
Vinyl acetate and ketene plants	Dempf and List (1998)
Water processes	Martinset al. (2010)

4.2 - Quelques références du laboratoire sur la détection de défauts

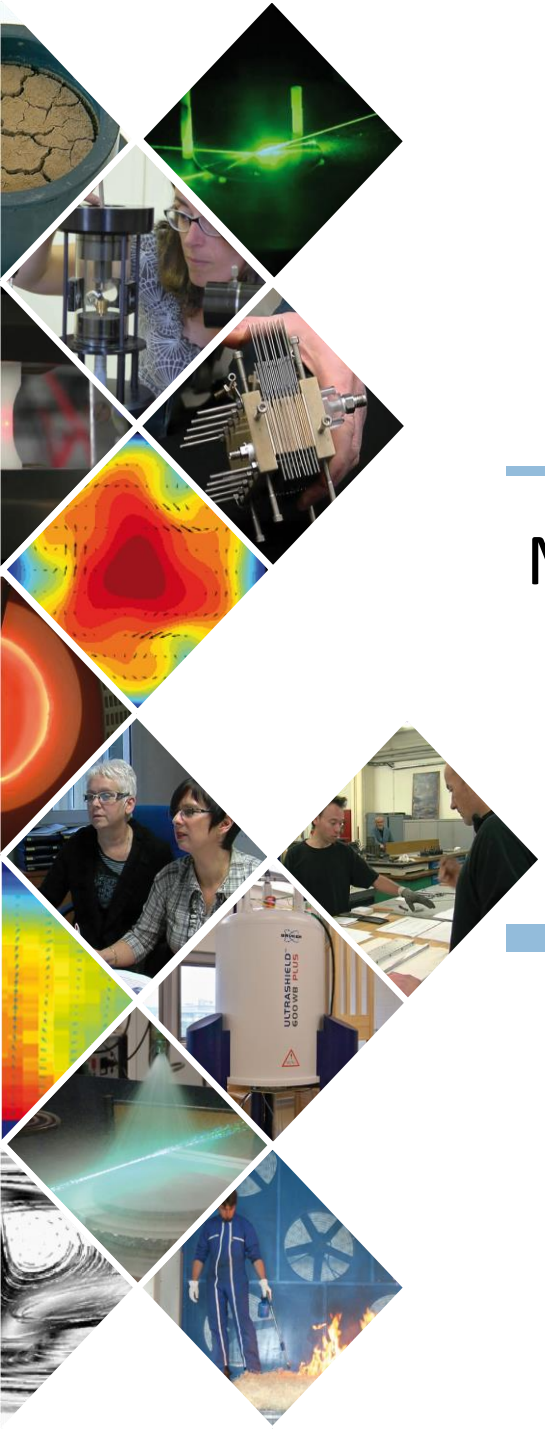
1. Ben Aicha A., Mourot G., Benothman K., Ragot J. Détermination de modèles ACP pour la détection et la localisation de défauts de capteurs. Jal Européen des Systèmes Automatisés, 2012.
2. Ben Hmida F., Khémiri K., Ragot J., Gossa M. Three-stage Kalman filter for state and fault estimation of linear stochastic systems with unknown inputs. Journal of the Franklin Institute, 2012
3. Ben Aicha A, Mourot G., Benothman K., Ragot J. Determination of Principal Component Analysis models for sensor fault detection and isolation. Intern. Journal of Control, Automation and Systems, 2013.
4. Schwaller B., Esminger D., Dresp B., Ragot J. State estimation for a class of non-linear systems. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2013.
5. Bezzaoucha S. Marx B., Maquin D., Ragot J. Nonlinear Joint State and Parameter Estimation : Application to a Wastewater Treatment Plant. Control Engineering Practice, 2013.
6. Bouarar T., Marx B., Maquin D., Ragot J. Fault tolerant control for uncertain Takagi-Sugeno systems by trajectory tracking : a descriptor approach. IET Control Theory and Applications, 2013.
7. Ragot J., Chadli M. Observation, diagnostic et commande tolérante aux fautes de systèmes modélisés par des multimodèles de type Takagi-Sugeno. Ecole en Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques, Strasbourg, 2013.
8. Basart L., Maquin D., Khelassi A., Bele B., Ragot J. Gradient approach for operating mode detection : application in continuous casting. 2nd International Conference on Control and Fault Tolerant Systems, Nice, 2013, France.
9. Kallas M., Mourot G., Maquin D., Ragot J. Fault estimation of nonlinear processes using kernel principal component analysis. European Control Conference, 2015.
10. Nagy Kiss A.M., Schutz G., Ragot J. Parameter estimation for uncertain systems based on fault diagnosis using Takagi-Sugeno model. ISA Transactions, 2015.
11. Nagy-Kiss A.M., Ichalal D., Schutz G., Ragot J. Fault tolerant control for uncertain descriptor multi-models with application to wastewater treatment plant. American Control Conference, 2015.
12. Kallas M., Mourot G., Maquin D., Ragot J. Fault estimation of nonlinear processes using kernel principal component analysis. Euopean Control Conference, ECC 2015, July 15-17, 2015, Linz, Austria.
13. Ichalal D., Marx B., Ragot J., Mammar S., Maquin D. Sensor fault tolerant control of nonlinear Takagi-Sugeno systems. Application to vehicle lateral dynamics, International Jal of Robust and Nonlinear Control, 2015.
14. El Mountassir M., Yaacoubi S., Ragot J., Mourot M., Maquin D. Feature selection techniques for identifying the most relevant damage indices in SHM using Guided Wavess. 8th European Workshop On Structural Health Monitoring, 2016.
15. Kallas M., Mourot G., Anan K., Ragot J., Maquin D. Fault detection and estimation using kernel principal component analysis. 20th IFAC World Congress, 2017.

4.3 - Quelques applications industrielles

1. E.D. Valdetaro, R. Schirru. Simultaneous Model Selection, Robust Data Reconciliation and Outlier Detection with Swarm Intelligence in a Thermal Reactor Power calculation. Annals of Nuclear Energy, 2011.
2. W. Wang, L. Chen, X. Han, Z. Ge, S. Wang S. Modeling and Application of Principal Component Analysis in Industrial Boiler. In : Zeng Z., Li Y., King I. (eds) Advances in Neural Networks, Lecture Notes in Computer Science, 2014.
3. V.S. Yellapu, A.P. Tiwari, S.B. Degweker. Application of Data Reconciliation and Fault Detection and Isolation of Ion Chambers in Advanced Heavy Water Reactor. Annals of Nuclear Energy, 2015.
4. E. Ahmadi, M. Hosein. ;Data reconciliation and gross error detection : application in chemical processes. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi, 2015.
5. A. Ragiee. Data reconciliation with application to a natural gas processing plant. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016.
6. D. Krpelik et al. Detection of Orbital Floor Fractures by Principal Component Analysis. In : Saeed K., Homenda W. (eds) Computer Information Systems and Industrial Management, 2016.
7. S.K. Fan, S.C. Lin, P.F. Tsai. Wafer fault detection and key step identification for semiconductor manufacturing using principal component analysis, AdaBoost and decision tree. Jal of Industrial and Production Engineering, 2016.
8. S. Guo, P. Liu, Z. Li. Identification and isolability of multiple gross errors in measured data for power plants, Energy, 2016.
9. T. Korpela, O. Suominen, Y. Majanne, V. Laukkanen, P. Lautala. Robust data reconciliation of combustion variables in multi-fuel fired industrial boilers. Control Engineering Practice, 2016.
10. O. Cencic, Nonlinear data reconciliation in material flow analysis with software STAN, Sustainable Environment Research, 2016.
11. S. Fellaou, T. Bounahmidi. Mass Balance Reconciliation for Bilinear Systems : A Case Study of a Raw Mill Separator in a Typical Moroccan Cement Plant. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2016.
12. O. Cencic. Nonlinear data reconciliation in material flow analysis with software STAN. Sustainable Environment Research, 2016. .
13. M.À. Cugueró-Escofet, D. García, J. Quevedo, V. Puig, S. Espin, J. Roquet. A methodology and a software tool for sensor data validation/reconstruction : Application to the Catalonia regional water network, Control Engineering Practice, 2016.
14. P.G. Stevenson, N.K. Burns, S.D. Purcell, P.S. Francis, N.W. Barnett, F. Fry, X.A. Conlan. Application of 2D-HPLC coupled with principal component analysis to study an industrial opiate processing stream. Talanta, 2017.
15. C. Noh, N. Azmin, A. Amid. Principal Component Analysis Application on Flavonoids Characterization. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Jal, 2017.

Quelques perspectives

- Pronostic : prévoir l'évolution des valeurs aberrantes au cours du temps
- Expliquer l'origine des valeurs aberrantes
- Influence des incertitudes de modèle sur la détection de valeurs aberrantes
- Couplage approche ACP et réconciliation de mesures



LABORATOIRE D' ÉNERGÉTIQUE ET DE MÉCANIQUE THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

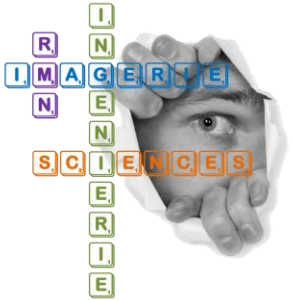
UMR 7563

Mesures IRM en sciences pour l'ingénieur

Jean-Christophe Perrin, Sébastien Leclerc, Maude Ferrari, Christian Moyne, Didier Stemmelen

Laboratoire LEMTA, Vandoeuvre-lès-Nancy

FEDERATION DE RECHERCHE J. Villermaux



IRM en Sciences pour l'ingénieur au laboratoire LEMTA

Rhéologie ↳ **convection dans des fluides non newtoniens**

Géosciences mesure de distributions de tailles de pores dans les roches (coll. Georessources, Nancy)

Combustion pyrolyse du bois (coll. LRGP, Nancy)

Rhéophysique étude de suspensions granulaires vibrées

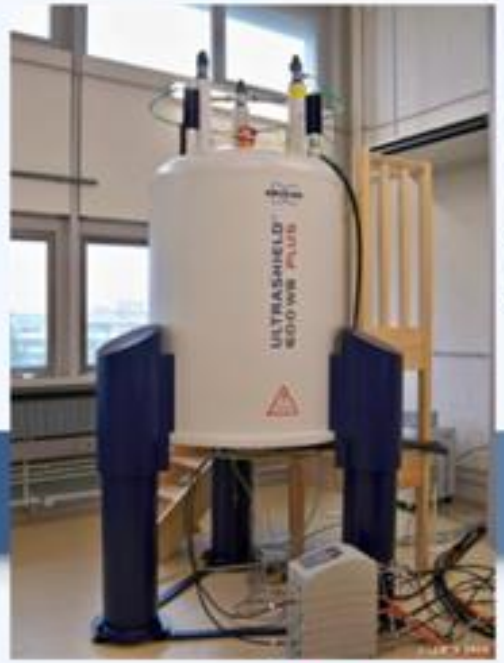
Procédés ↳ **cartes de vitesses dans des fibres hélicoïdales utilisées dans les procédés de séparation** (coll. LRGP, Nancy)

Milieux poreux dispersion de fluides, écoulements diphasiques

Matériaux pour l'énergie ↳ **diffusion et transport d'eau dans les membranes polymères pour piles à combustible**

Instrumentation IRM

Bruker Avance III WB



600MHz (¹H)

14.1 T

SPECTROMETRE HAUT CHAMP

- micro imagerie
- rhéologie

Bruker Biospec 24/40

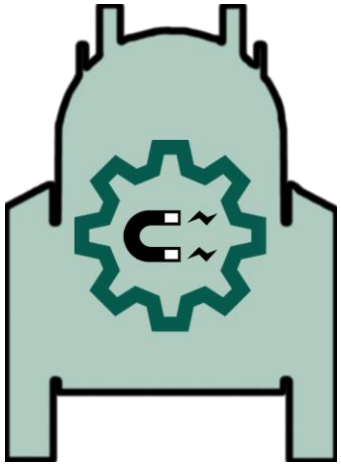
100MHz (¹H)

2.34 T

IMAGEUR

- pour dispositifs + encombrants
- permet d'instrumenter

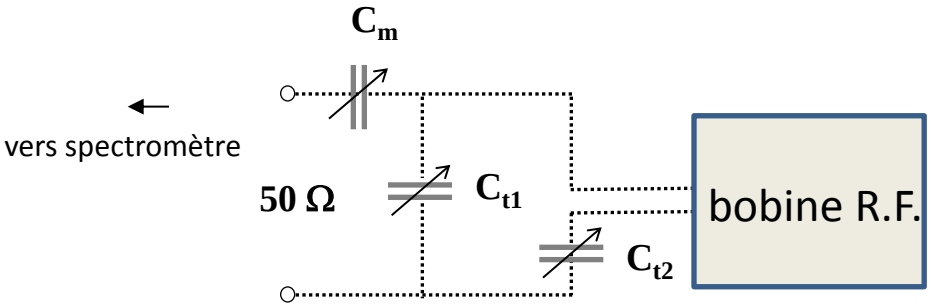
Instrumentation IRM



• aimant principal → champ intense homogène (supraconducteur)

+

• sonde → excitation + détection signal RMN

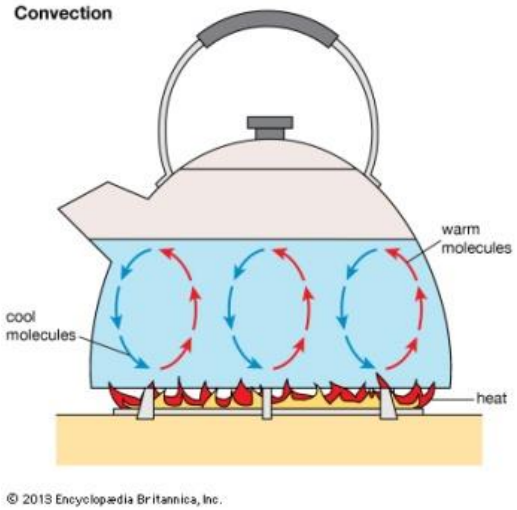


+

• gradients de champ magnétique (électro-aimants)

= inhomogénéités de champ maitrisées pour encoder spatialement l'information
→ détection du mouvement + imagerie

convection dans des fluides : thermométrie et vélocimétrie



convection:

Transfer de chaleur dû au déplacement des molécules

Chauffage : dilatation -> poussée d'Archimède

Refroidissement : contraction -> poussée d'Archimède

Présence dans de nombreux phénomènes

méthodes de caractérisation:

Laser-induced Fluorescence (LiF)

Particle Imagine Thermometry

→ IRM

Thermométrie RMN pour l'étude de la convection

✗ - Variation de l'intensité du signal avec T (loi de Curie) → **pas assez précis, SNR trop faible (sauf à très basse T)**

✗ - Variation du coefficient de diffusion (T est le « moteur » de la diffusion) → **ok pour un fluide statique, ne convient pas pour un fluide en écoulement**

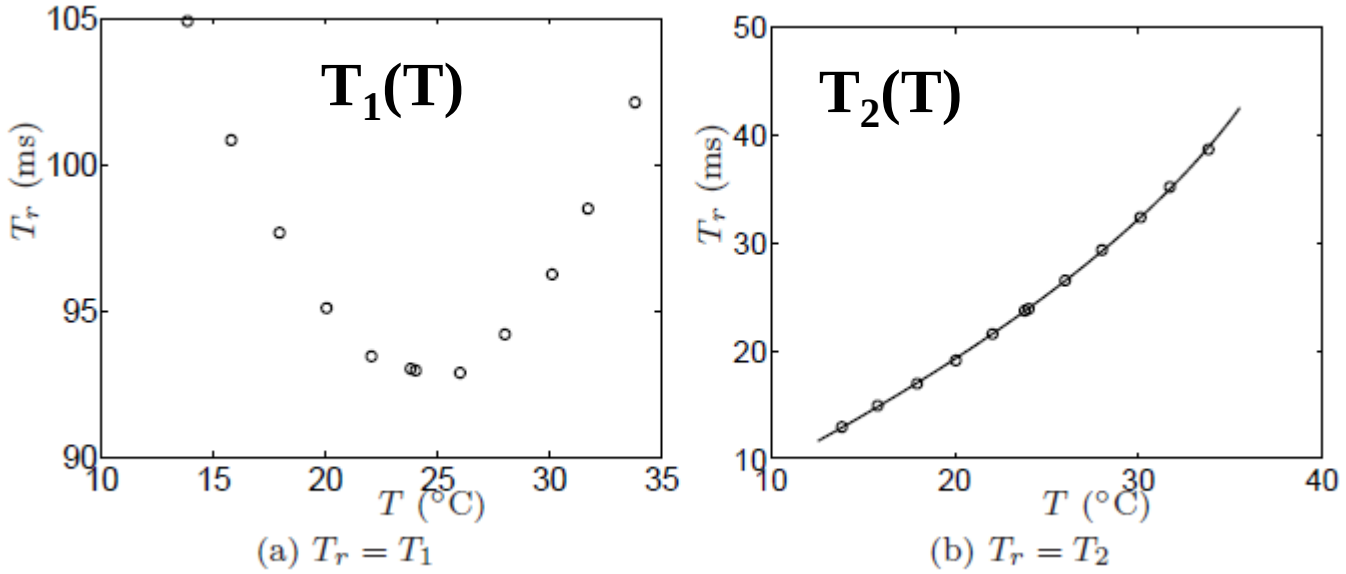
✗ - Variation de la position de la raie de résonance (déplacement chimique, CS)
-> mesure directe ou par mesure du déphasage du signal → **besoin d'une référence, valide sur une grande période de temps → non applicable pour l'étude d'instabilité convectives**

- **Variation des temps de relaxation longitudinale (T_1) ou transversale (T_2)** → non utilisé dans le médical car nécessite un étalonnage pour chaque tissu individuel.
ICI: OK !

convection dans des fluides : thermométrie et vélocimétrie

Mesures de température par cartographie des temps de relaxation $T_1(T)$, $T_2(T)$

étalonnage dans le glycérol



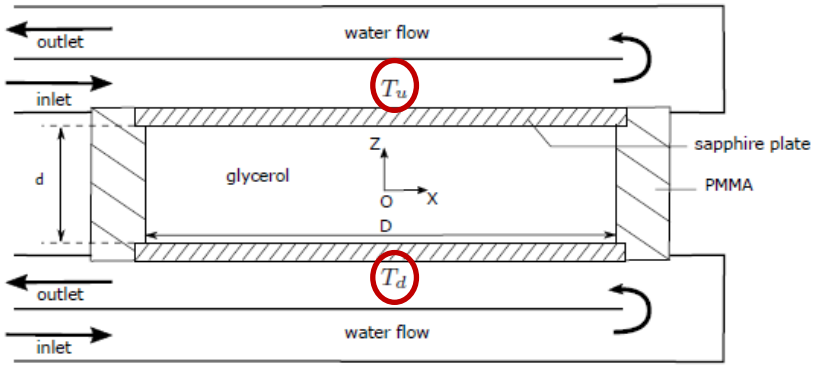
-T_1 plus facile à mesurer et plus précis mais mesures plus longues

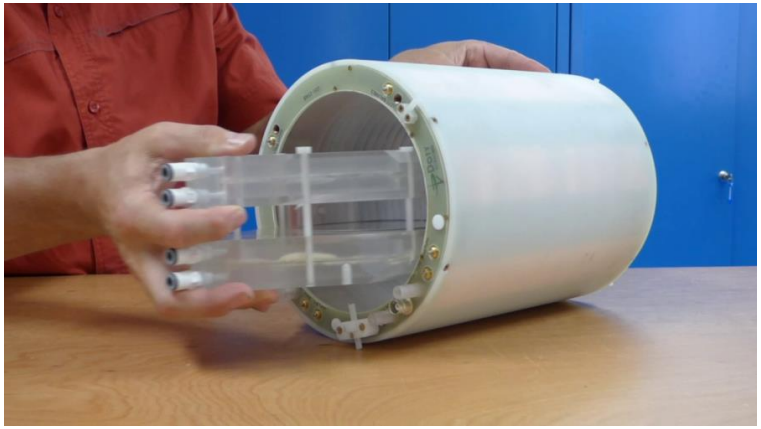
- T_2 : erreurs de mesure plus importantes

M. Darbouli, C. Métivier, S. Leclerc, C. Nouar, M. Bouteera, D. Stemmelen, International Journal of Heat and Mass Transfer, 95, 742-754 (2016)

Leclerc S., Métivier C., MRI temperature and velocity measurements in a fluid layer with heat transfer. *Experiments in Fluids*, (2018)

convection dans des fluides : thermométrie et vélocimétrie





résonateur en quadrature (Doty)
∅16cm

<u>dispositif:</u>

→développé pour l'étude d'instabilités convectives (Rayleigh-Bénard) dans les fluides non-newtoniens (gomme de Xanthane)

→ testé ici pour un fluide newtonien (glycérol)

<u>régimes de convection :</u>

❶ conductif lorsque $T_d < T_u$
→ stratification linéaire des couches de fluide

❷ instabilité convective lorsque $T_u < T_d$ et ΔT suffisamment grand

$$Ra = \frac{\text{Poussée d'Archimède}}{\text{Effets visqueux * Diffusion thermique}}$$

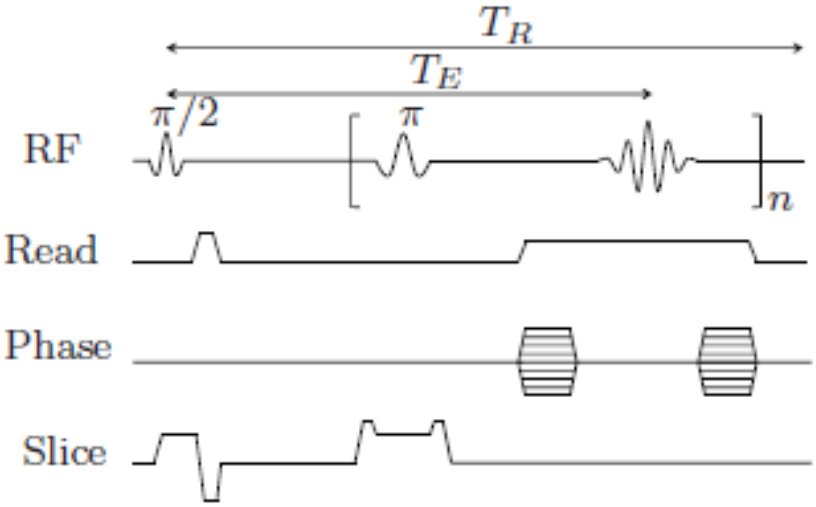
$$Ra = \frac{\rho g \beta \Delta T d^3}{\mu \kappa}$$

μ : viscosité
β : compressibilité
κ : diffusivité thermique

instabilités pour $1820 < Ra < 1990$ dans ce dispositif

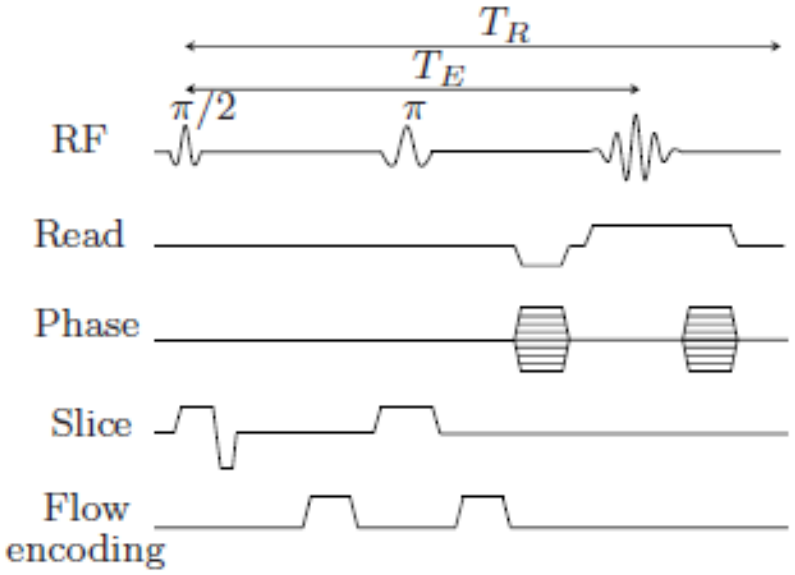
Séquences IRM

cartographie de T_1, T_2



T_1 : n=1 ; TE=11 ms ; 30 ms <TR <750 ms
T_2 : n=8 ; TE=12 ms ; TR=500ms

cartographie de vitesse



0 < G < 180 mT/m

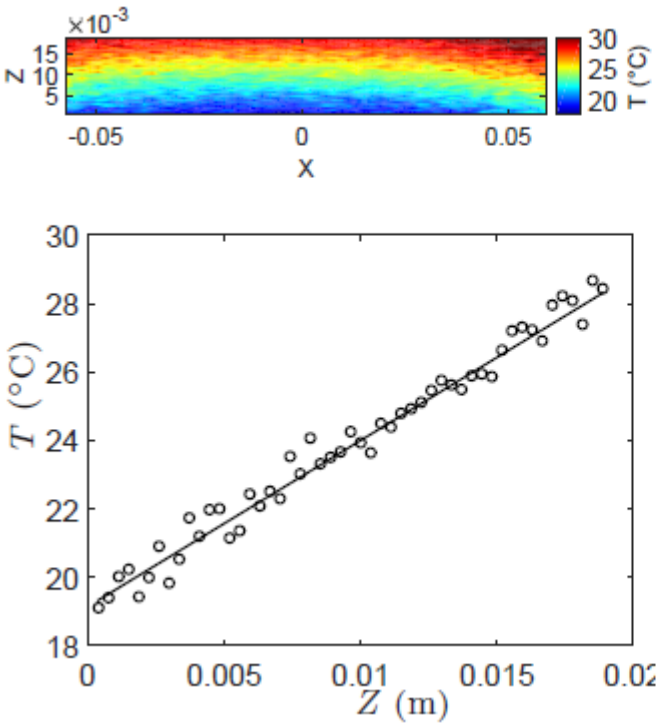
M. Darbouli, C. Métivier, S. Leclerc, C. Nouar, M. Bouteera, D. Stemmelen, International Journal of Heat and Mass Transfer, 95, 742-754 (2016)

Leclerc S., Métivier C., MRI temperature and velocity measurements in a fluid layer with heat transfer. *Experiments in Fluids*, (2018)

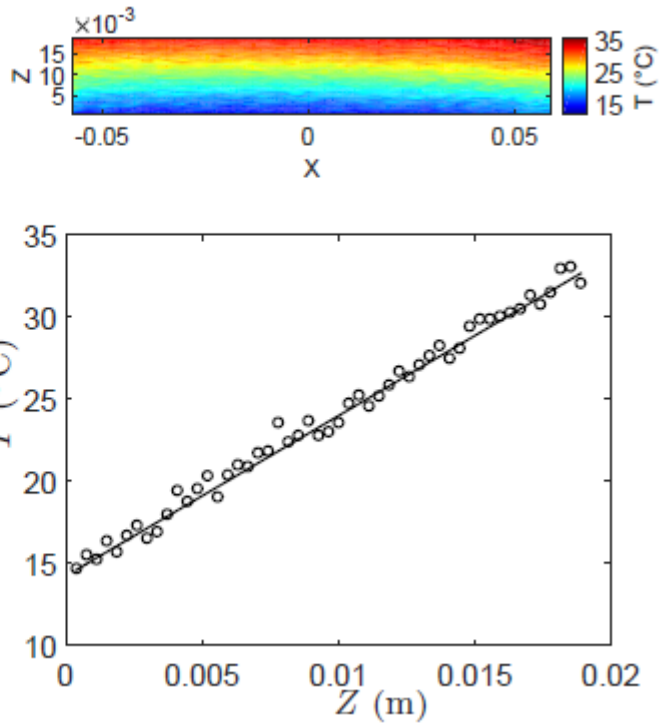
convection dans des fluides : thermométrie et vélocimétrie

- Régime conductif dans le Glycerol. Statification verticale.

ΔT = -9.7°C



ΔT = -19.5°C



profils de température à x = 0

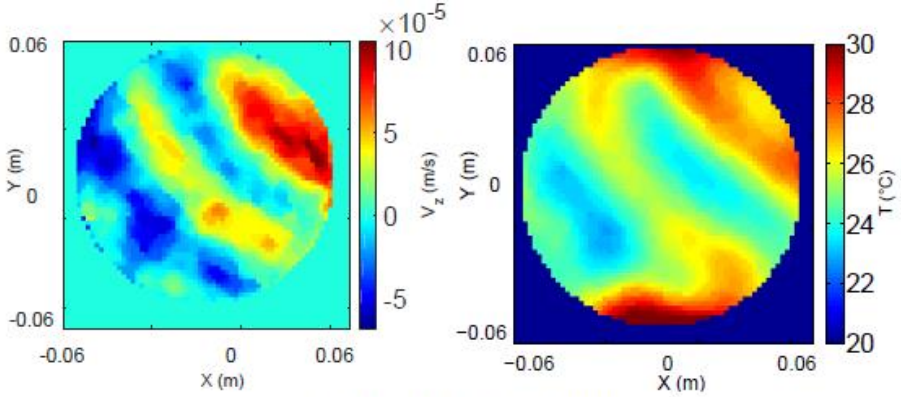
M. Darbouli, C. Métivier, S. Leclerc, C. Nouar, M. Bouteera, D. Stemmelen, International Journal of Heat and Mass Transfer, 95, 742-754 (2016)

Leclerc S., Métivier C., MRI temperature and velocity measurements in a fluid layer with heat transfer. *Experiments in Fluids*, (2018)

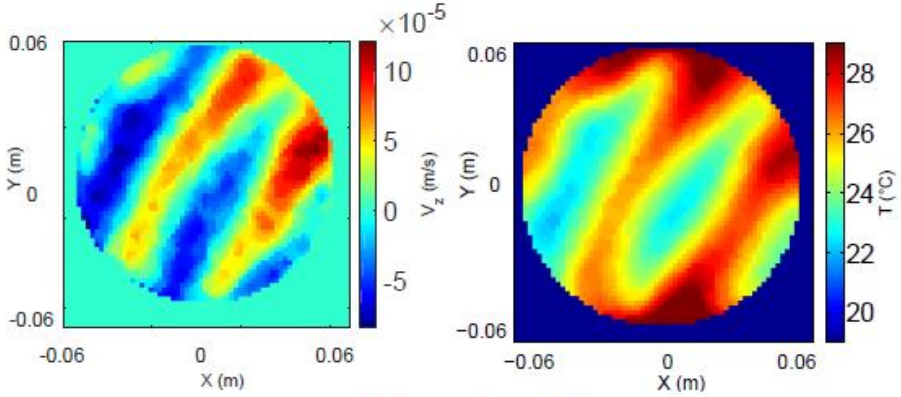
convection dans des fluides : thermométrie et vélocimétrie

• Régime convectif dans le Glycerol. Instabilités de Raleigh Bénard.

vue de dessus
épaisseur tranches : 2 mm
field of view: 12*12 cm
64*64 pixels



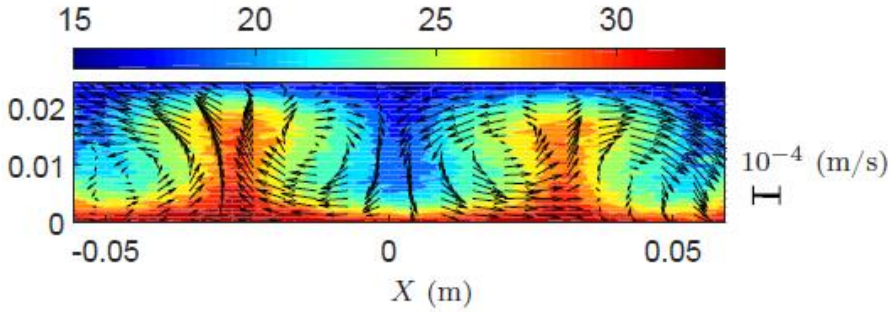
(a) $\Delta T = 4.7,\ Ra = 2680$



(b) $\Delta T = 7.2,\ Ra = 4095$

vue de côté
épaisseur tranches : 2 mm
field of view: 2.5*12 cm
64*64 pixels

$\Delta T = 15°C$



• application à des fluides non Newtonien

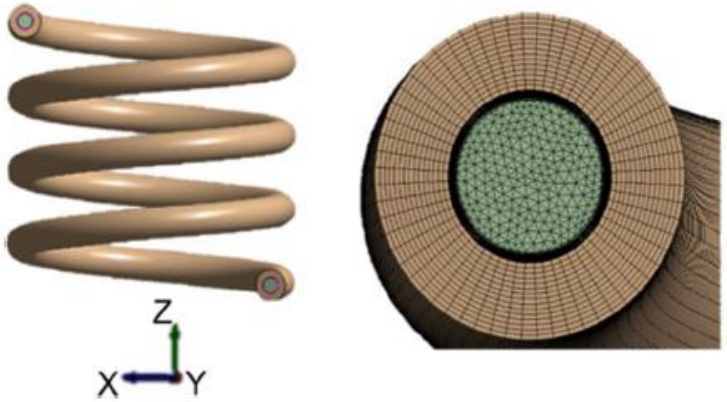
• application à des matériaux à changement de phase pour le stockage de la chaleur

cartes de vitesses dans des fibres hélicoïdales utilisées dans les procédés de séparation (coll. laboratoire LRGP, Nancy)

contacteurs membranaires à fibres creuses = outils d'intensification de procédés de séparation.

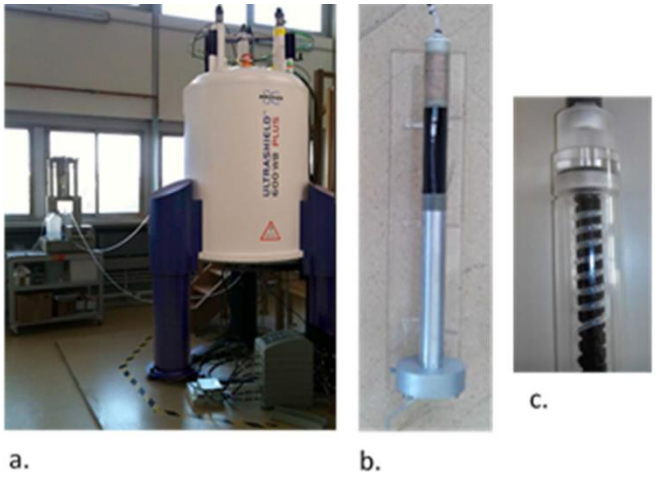
→ utilisés dans : capture de CO_2, purification de biogaz, production de biofuel dans des bioréacteurs, production d'eau potable, nitrogénation de la bière, etc…

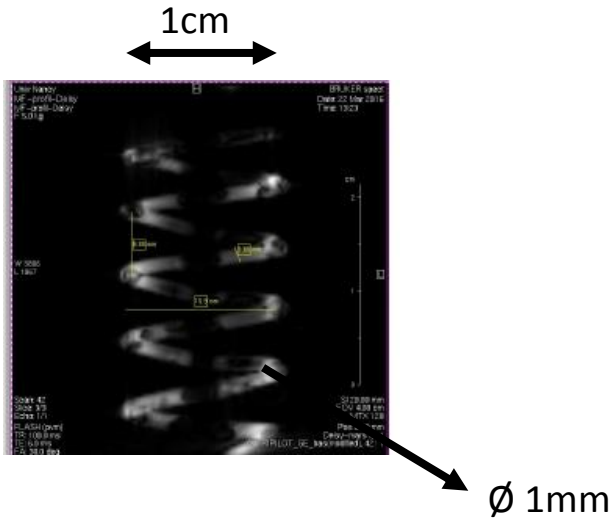
Principe : tire profit de l'apparition de **vortex de Dean** comme outil d'intensification du procédé par diminution de la résistance au transfert de masse à travers la membrane



[maillage d'une fibre creuse avant simulations CFD sous Ansys Fluent]

cartes de vitesses dans des fibres hélicoïdales utilisées dans les procédés de séparation (coll. laboratoire LRGP, Nancy)





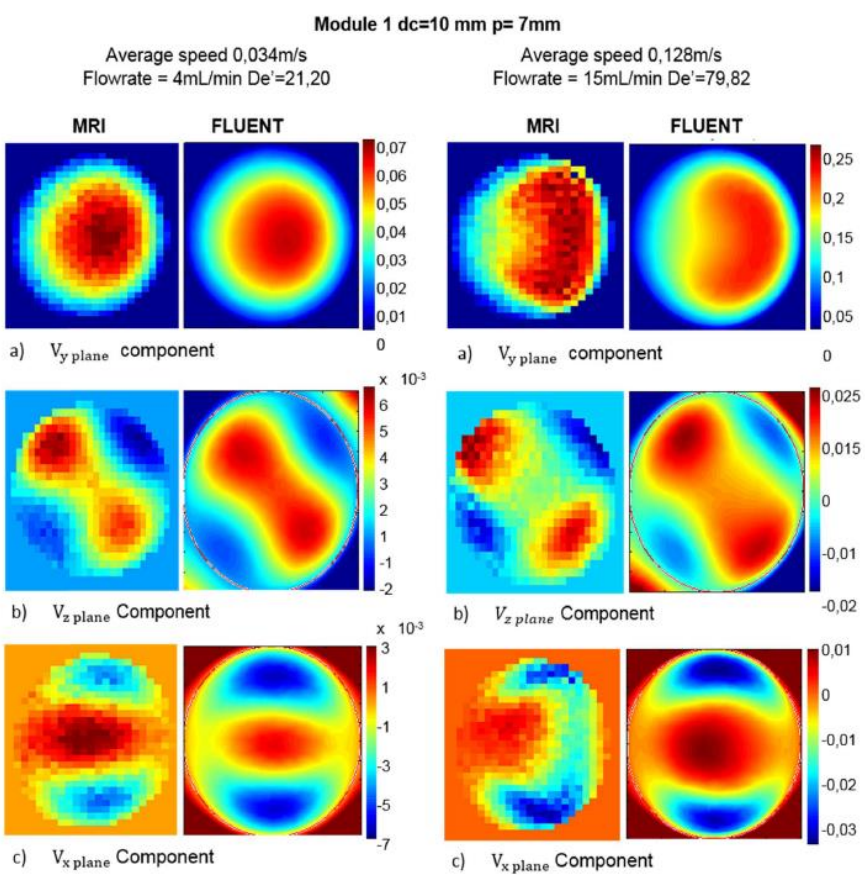
MRI equipement: **a.** Bruker avance III 600 Wide Bore
b. MicWB40 probe **c.** Helical membrane module.

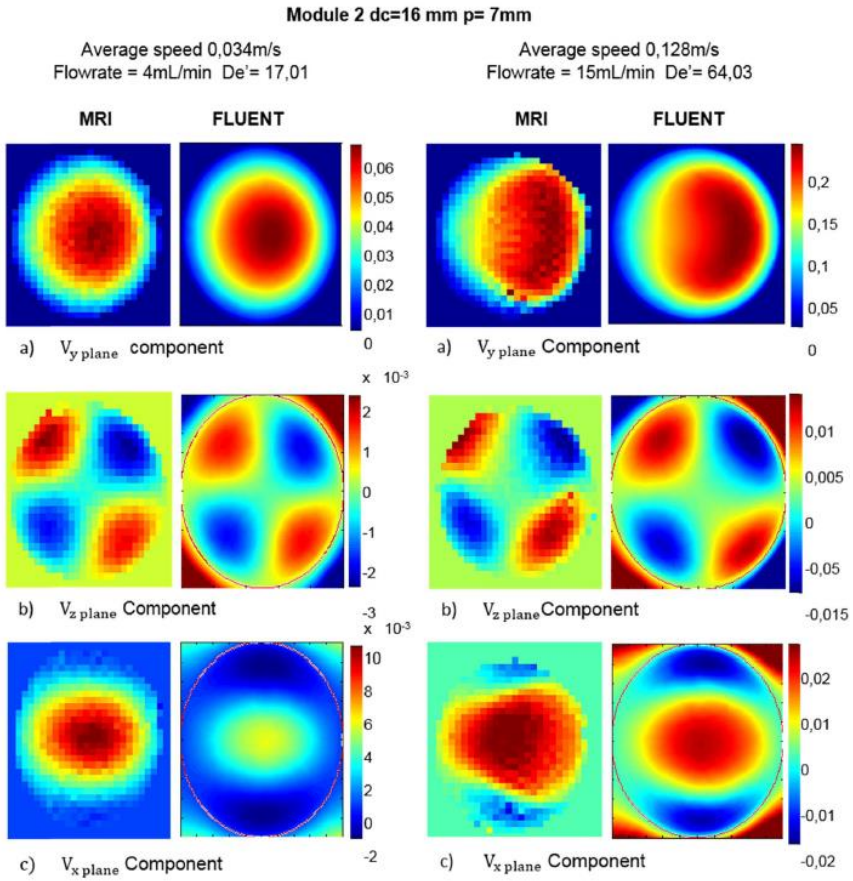
objectif : création de vortex et amélioration du procédé en variant les paramètres :

- température
- diamètre de fibre
- vitesse d'écoulement
- pas de l'hélice

D. L. M. Mendez, C. Lemaitre, C. Castel, M. Ferrari, H. Simonaire, E. Favre *Membrane contactors for process intensification of gas absorption into physical solvents: Impact of dean vortices* J. Memb. Sci., 2017, 20-32

cartes de vitesses dans des fibres hélicoïdales utilisées dans les procédés de séparation (coll. laboratoire LRGP, Nancy)



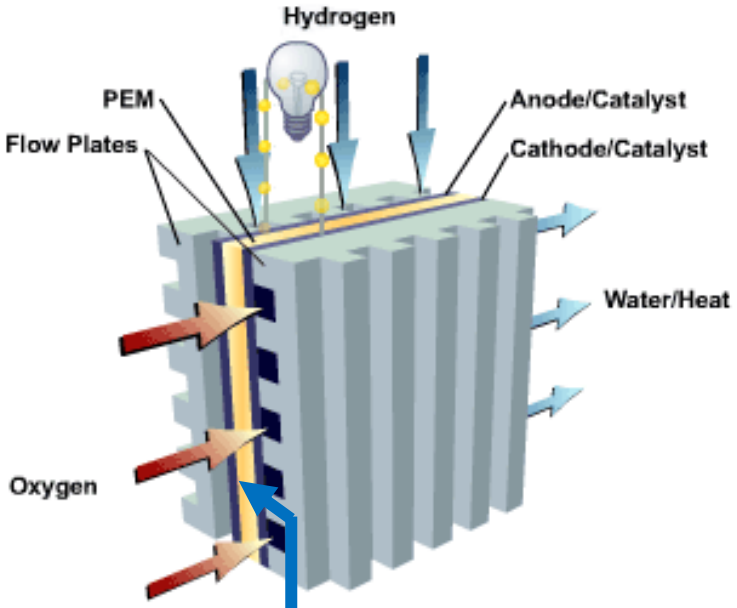


Conclusion : validation de la méthode de simulation CFD pour prédire quantitativement les vortex de Dean

D. L. M. Mendez, C. Lemaitre, C. Castel, M. Ferrari, H. Simonaire, E. Favre *Membrane contactors for process intensification of gas absorption into physical solvents: Impact of dean vortices* J. Memb. Sci., 2017, 20-32

contexte

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell



membrane échangeuse de protons
= le cœur du système

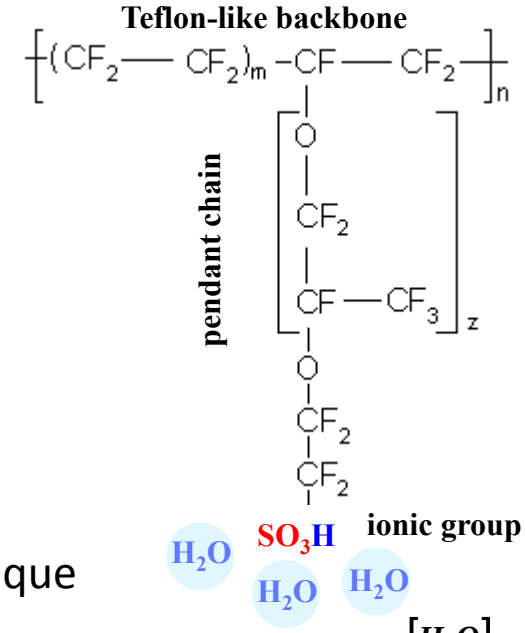
- conversion de H_2 en
  - électricité
  - eau
  - chaleur
- utilisation à basse température (60 - 80°C)
- applications basses et moyennes puissances:
  - applications mobiles (~ 10 W)
  - véhicules (~ 100 kW)
  - applications stationnaires (1 kW→1 MW)

diffusion et transport d'eau dans les membranes polymères pour piles à combustible

Membrane échangeuse de protons:

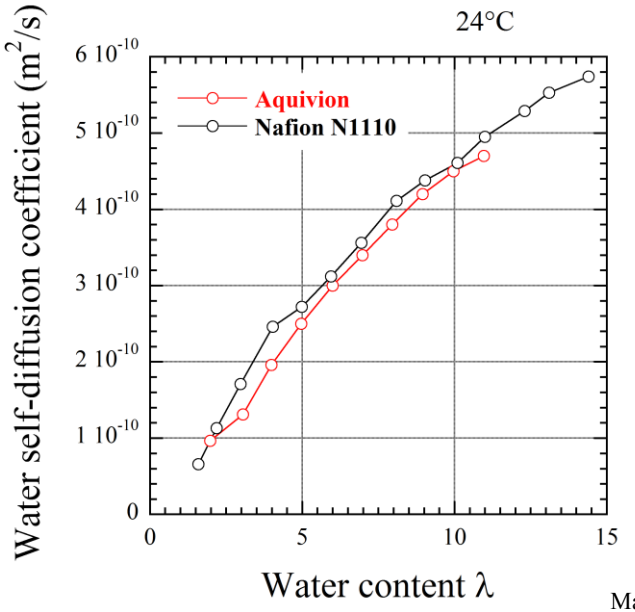
- capacité de sorption d'eau élevée
- propriétés dépendantes de la teneur en eau

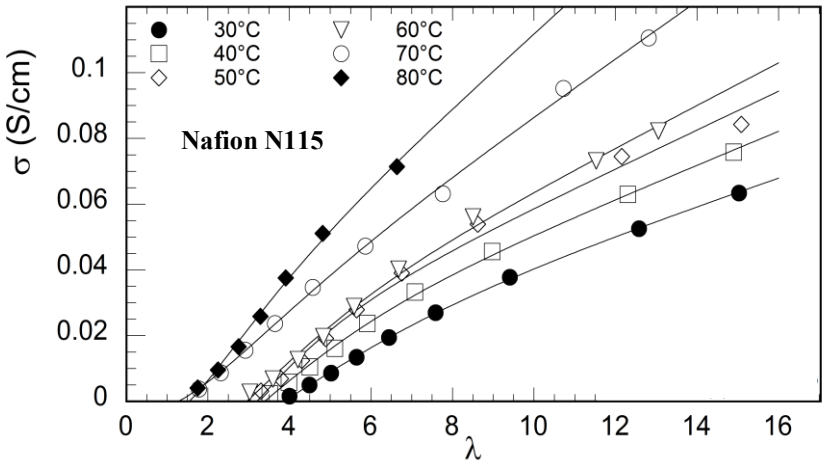
50 < e < 250 µm



coefficient d'autodiffusion de l'eau ⟷ conductivité protonique

$$\lambda = \frac{[H_2O]}{[SO_3H]}$$

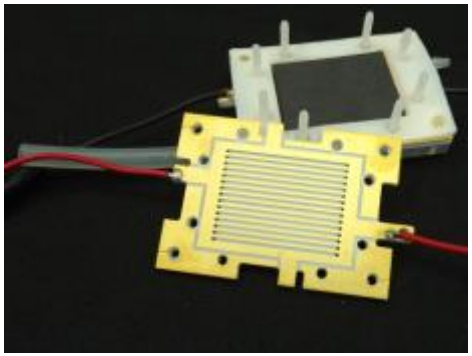




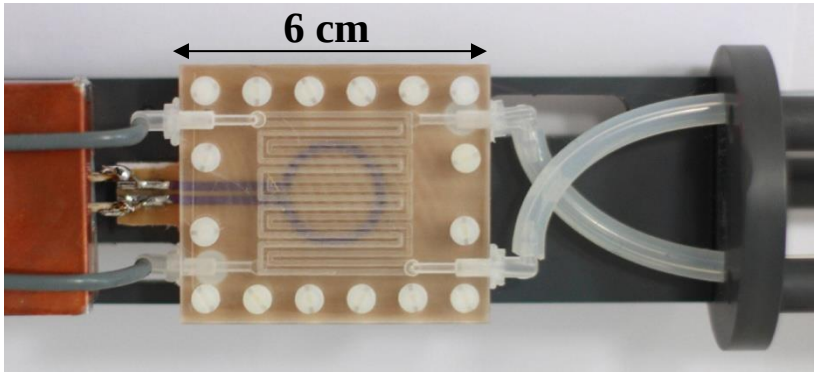
Maldonado L., Perrin J.-C. et al. *J. Membr. Sci. 2012, 389, 43-56*

Dispositifs « maison » dédiés à l'étude RMN/IRM de membranes

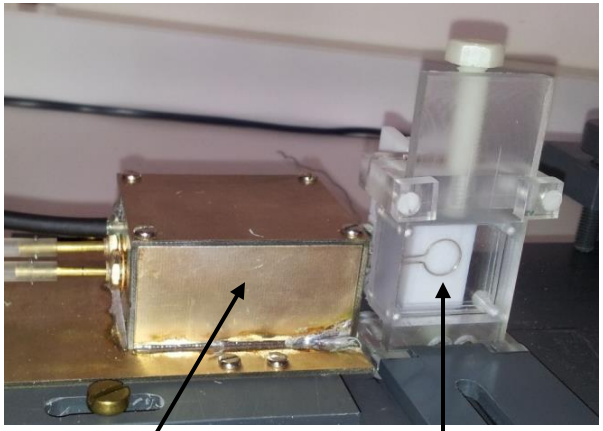
mini-pile à combustible compatible IRM



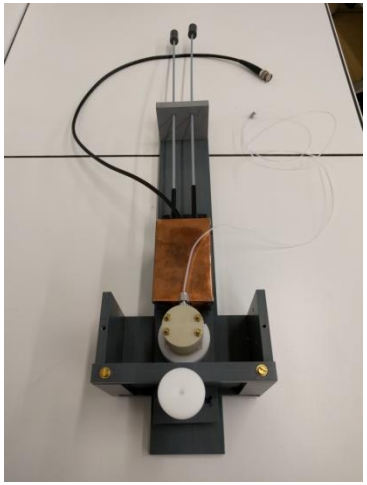
cellule pour l'IRM de membranes
(hygrométrie contrôlée)

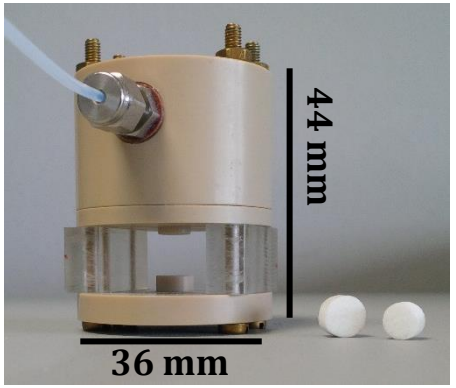


dispositif de traction



cellule de compression



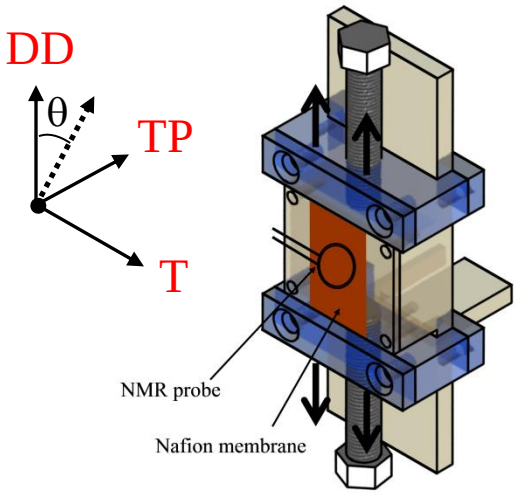


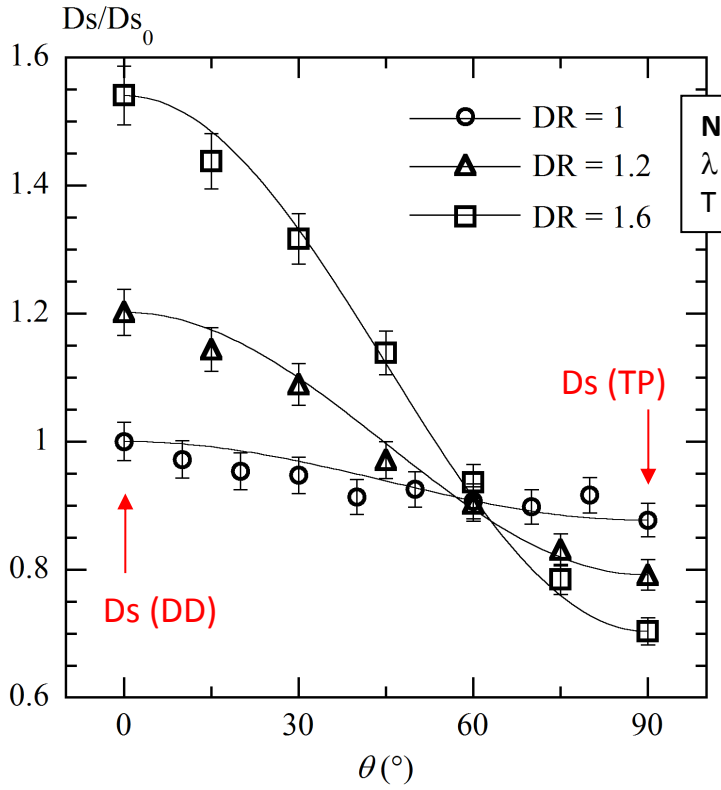
Klein, M., Perrin JC et al. *Macromolecules,* 46 (23) 9259-9269 (2013)

A. El Kaddouri, J.-C. Perrin et al. *Macromolecules*, 49 (9), 7296-7307 (2016)

diffusion et transport d'eau dans les membranes polymères pour piles à combustible

objectif : lier l'anisotropie de diffusion à la structure déformée de la membrane





Nafion 1110
λ = 4 ± 0.5
T = 25°C

fitting curve:

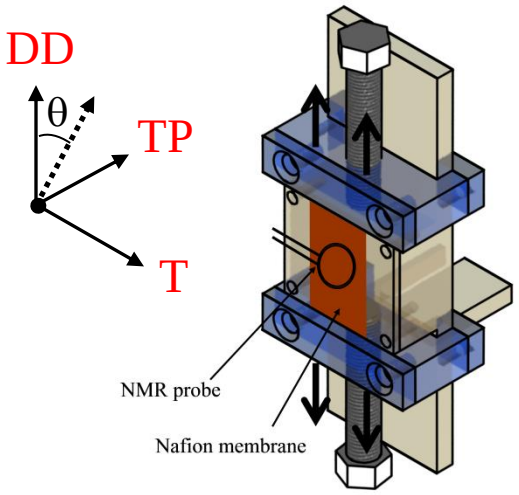
$$\frac{Ds}{Ds_0}(\theta)=\frac{Ds\,(DD)}{Ds_0}\cos^2(\theta)+\frac{Ds\,(TP)}{Ds_0}\sin^2(\theta)$$

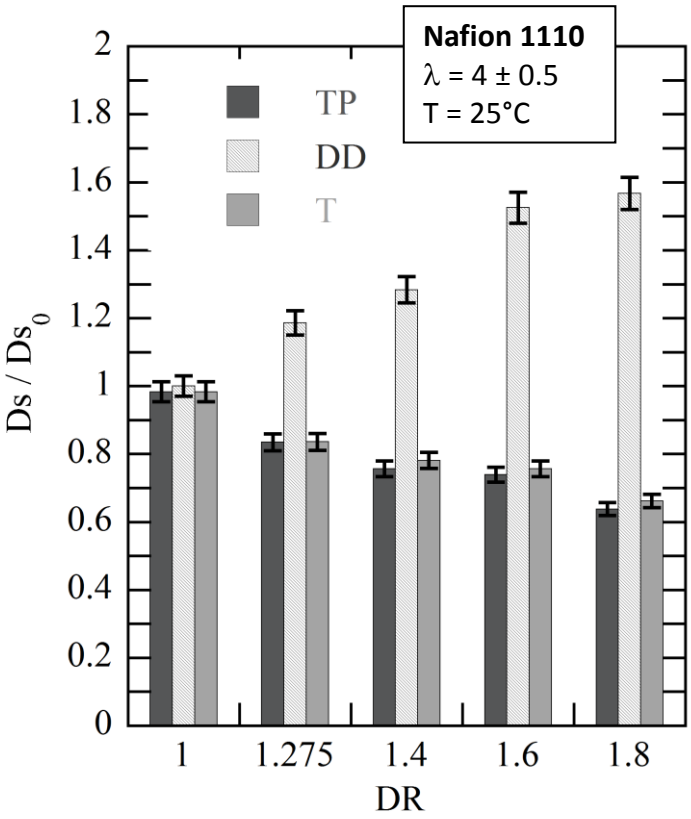
- Ds (DD) accélère alors que Ds (TP) ralentit
- forte anisotropie de diffusion, augmente avec le rapport d'étirement DR

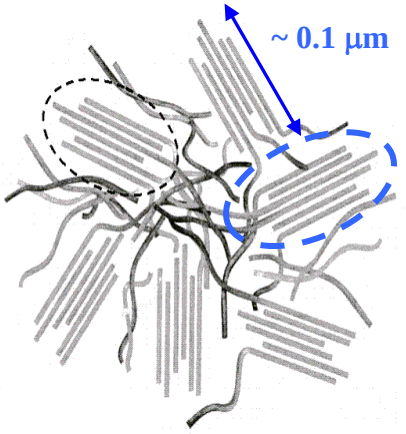
Klein, M., Perrin JC et al. *Macromolecules,* 46 (23) 9259-9269 (2013)

diffusion et transport d'eau dans les membranes polymères pour piles à combustible

objectif : lier l'anisotropie de diffusion à la structure déformée de la membrane





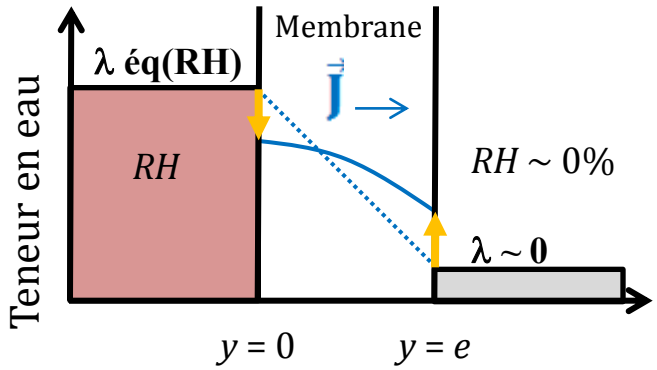


- ❑ Ds (T) = Ds (TP)
- ❑ symétrie uniaxe du tenseur de diffusion
- ❑ réseau de canaux d'eau qui « tournent » autour de la direction d'étirement

Klein, M., Perrin JC et al. *Macromolecules,* 46 (23) 9259-9269 (2013)

diffusion et transport d'eau dans les membranes polymères pour piles à combustible

Etude de la diffusion et du transfert d'eau aux interfaces de la membrane

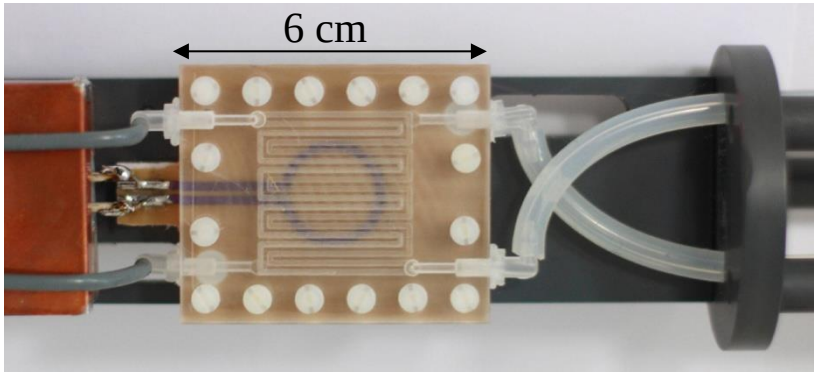


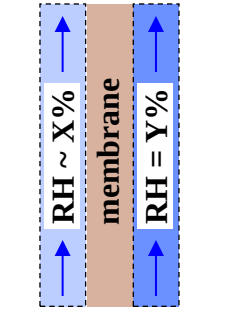
Sous l'effet d'un gradient d'humidité:

- flux d'eau J ~ $D_m \Delta C$
- forme des profils d'eau ←→ évolution de $D_m(\lambda)$
- résistances aux transferts de masse ***h*** aux interfaces

- peut-on déterminer la fonction $D_m(\lambda)$ à partir de la mesure IRM 1D de profils d'eau ?
- quel est le lien avec $D_s(\lambda)$?
- peut-on déterminer $h(\lambda)$?

diffusion et transport d'eau dans les membranes polymères pour piles à combustible



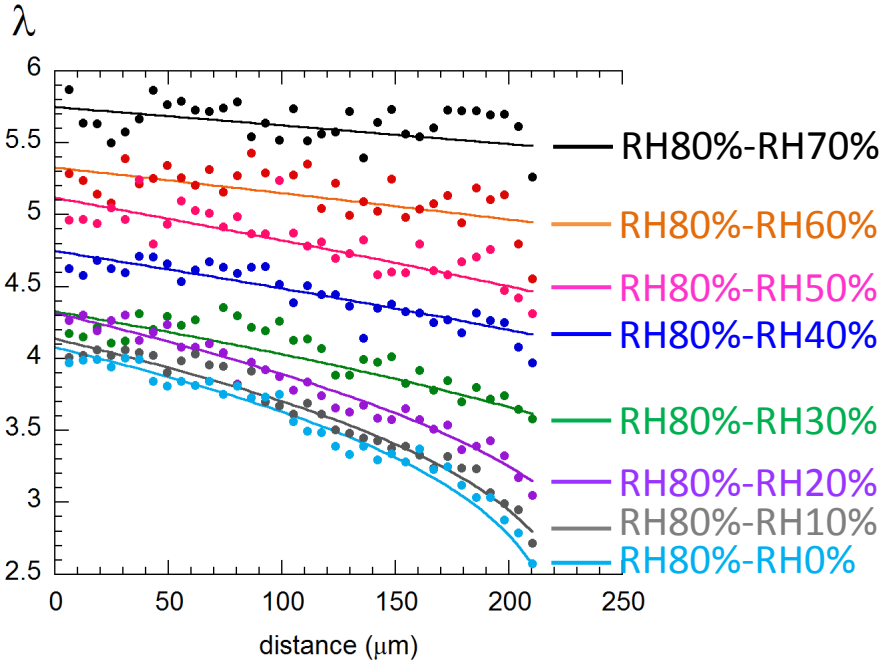


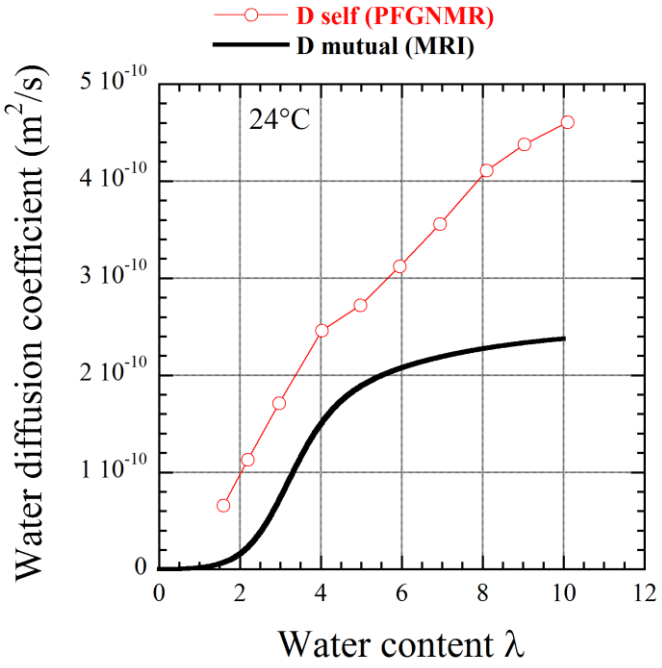
T = 24°C

$$Dm = a\frac{1-\exp(-b\lambda)}{1+\exp[-c(\lambda-d)]}$$

$a = 2.5.10^{-10} m^2/s$

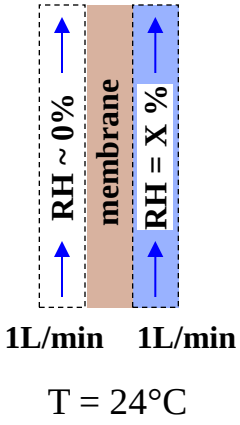
$b = 0.3; c = 1.8; d = 3$



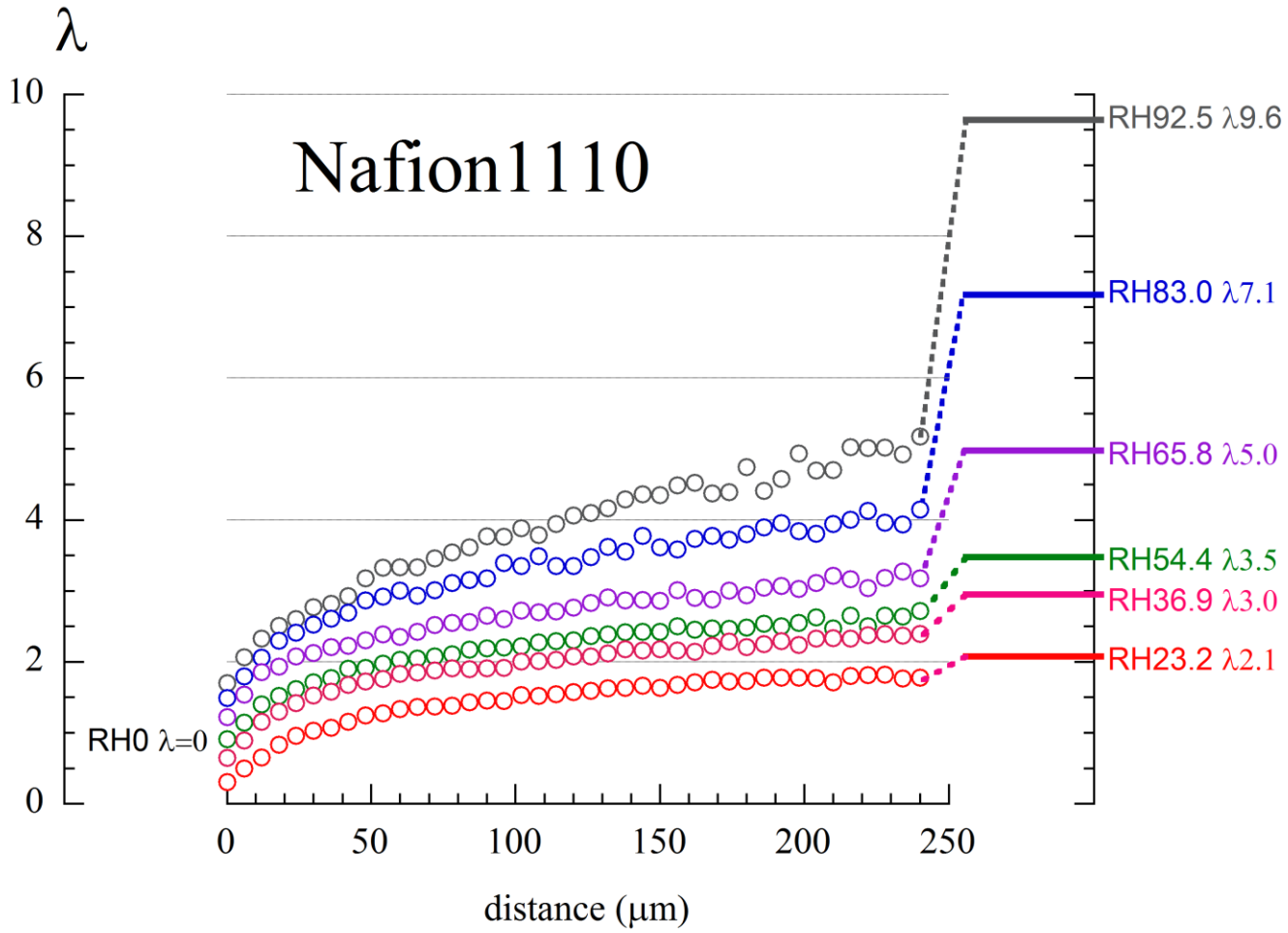


direct modeling with Matlab® (finite differences)

diffusion et transport d'eau dans les membranes polymères pour piles à combustible

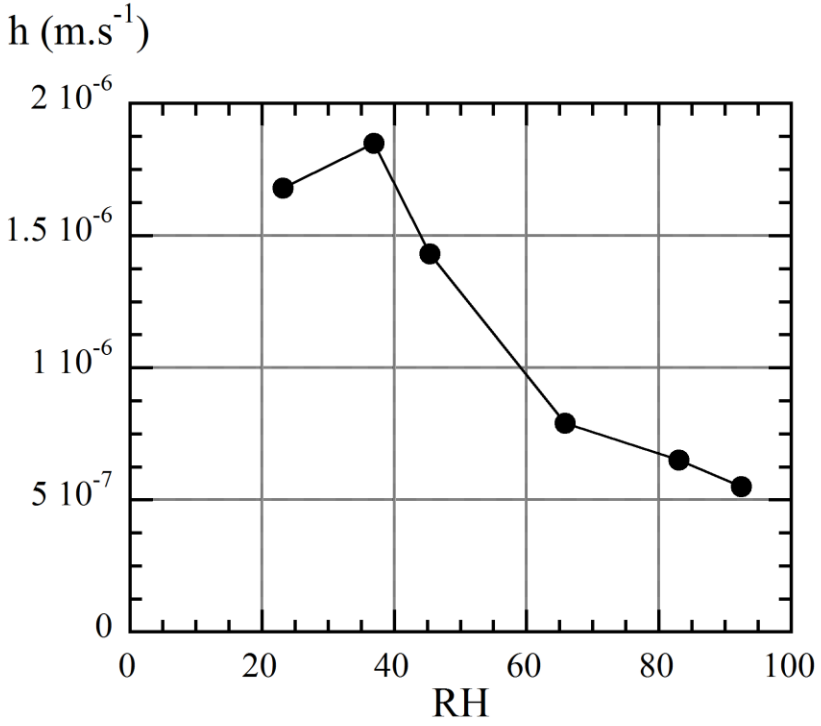


T = 24°C



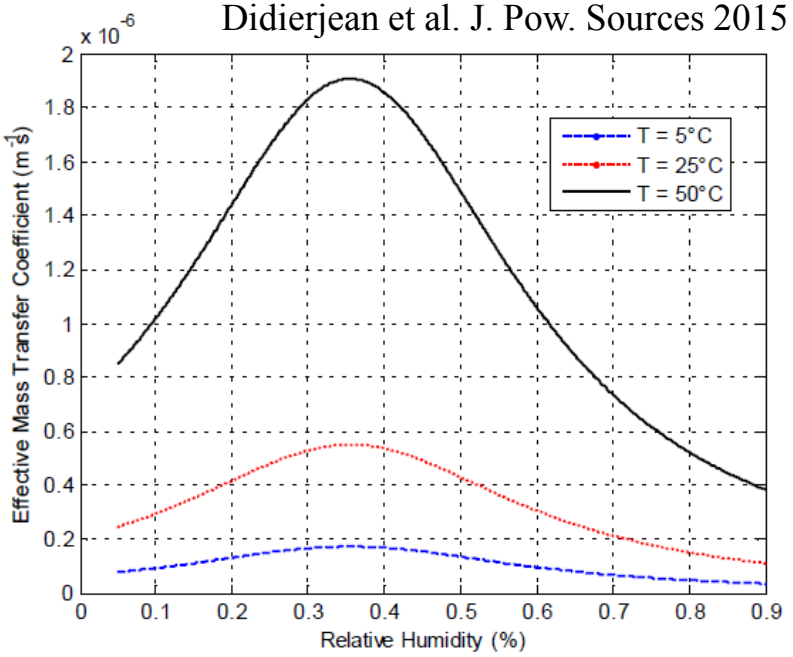
diffusion et transport d'eau dans les membranes polymères pour piles à combustible

➢ Résistances d'interface *h* dans le Nafion N1110

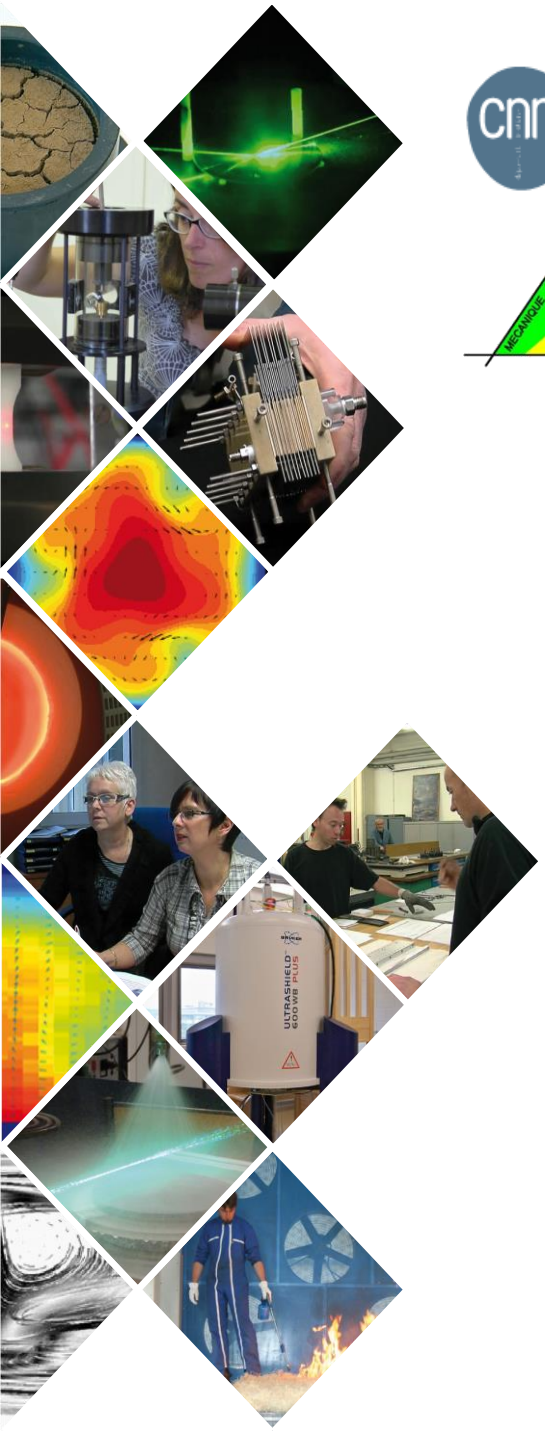


mesures IRM

Didierjean et al. J. Pow. Sources 2015



calcul $k = h\frac{P_{sat}(T)}{RT}\frac{1}{\gamma C_{SO_3H}}$

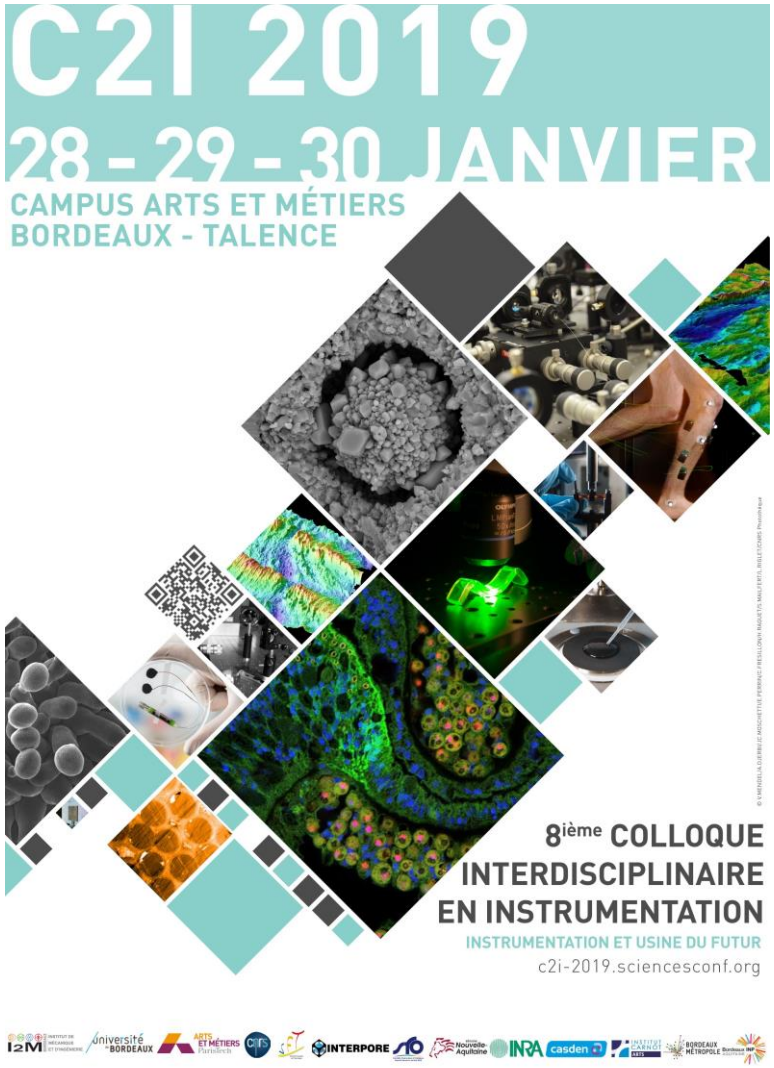


LABORATOIRE D' ÉNERGÉTIQUE ET DE MÉCANIQUE THÉORIQUE ET APPLIQUÉE
UMR 7563

➢ CONCLUSIONS

• IRM adaptée à beaucoup de systèmes relevant des sciences pour l'ingénieur et des procédés, en particulier ceux mettant en jeu de l'eau liquide

• des dispositifs compatibles et une instrumentation radiofréquence dédiée doivent souvent être développés



Cérémonie de cloture

A.SOMMIER Président du C2I 2019

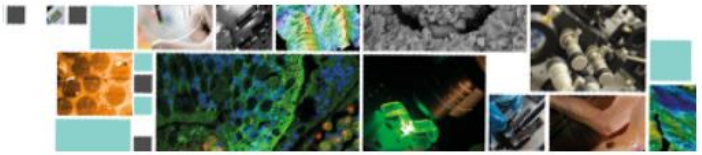
Un congrès dense…mais…

I2M BORDEAUX

UMR CNRS 5295

RÉGION Nouvelle-Aquitaine

Un grand merci à tous ceux que j'oublie…
au comité scientifique Pascal(s), Eric, Francois, Muriel & Audrey, Jean Marc, Christophe,
Arnaud, Yan et toute l'équipe Arts et Métiers et vous…



C2i 2019 : 8ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation

28-30 janv. 2019 Talence (France)

casden

BORDEAUX MÉTROPOLE

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

Trescal

INTERPORE

Société Française de Thermique

cnrs

RÉGION Nouvelle-Aquitaine

université de BORDEAUX

INSTITUT DE MÉCANIQUE ET D'INGÉNIERIE I2M BORDEAUX

Société Française d'Optique French Branch of the EOS

Newport®

INRA SCIENCE & IMPACT

Bordeaux INP AQUITAINE

THERMOCONCEPT

acal bfi

INSTITUT CARNOT ARTS

EPSILON ALCEN

Bronkhorst®

C2i 2022: 9ème Colloque Interdisciplinaire en instrumentation

Grenoble – Janvier 2022
campus universitaire

Organisateurs: Benjamin Cross et Olivier Jacquin,
Université Grenoble-Alpes LIPhy

Laboratoire interdisciplinaire de Physique

C2i 2019 :

8ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation

INSTRUMENTATION et METROLOGIE

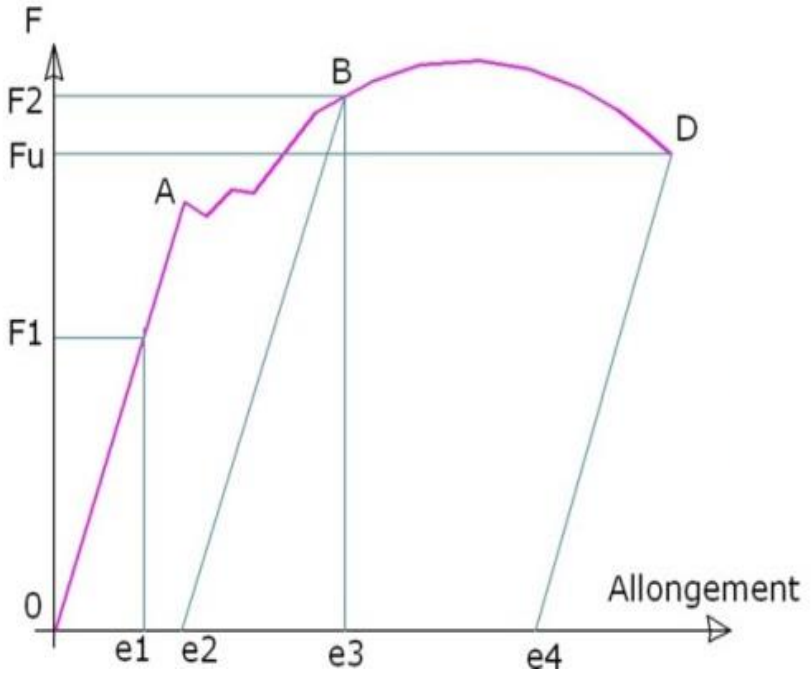
Pascal LE ROUX
Arts et Métiers ParisTech Bordeaux
Membre du P.A.M.
Bernard LARQUIER
BEA métrologie, président du P.A.M.

Pôle Aquitain de Métrologie

C2I - 30 janvier 2019

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

Plan de la présentation



Introduction

Instrumentation et étalonnage

Processus de mesure et Incertitudes de Mesure

L'exploitation des Incertitudes de Mesure

Conclusion provisoire

Introduction

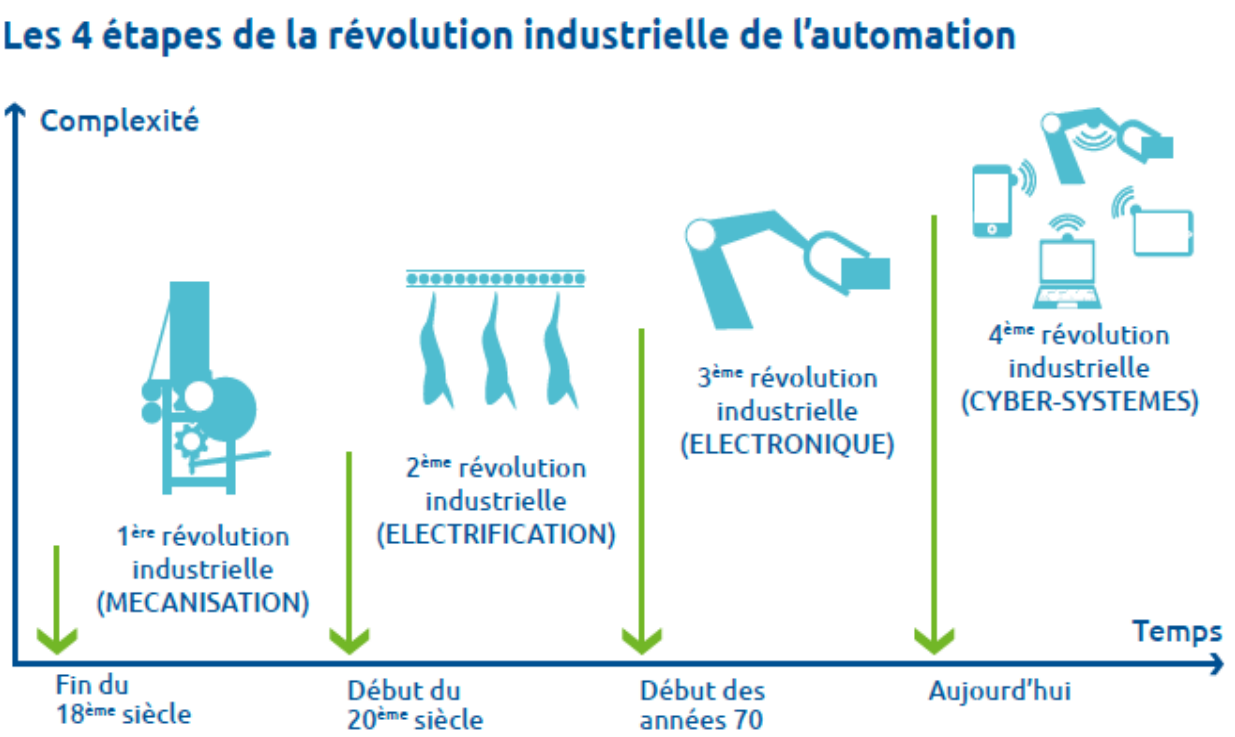
4 évolutions récentes amplifient le rôle de l'instrumentation et de la métrologie :

Les objets « intelligents » et « connectés »

L'industrie du futur : 4.0

L'exigence croissante de l'industrie en maîtrise des processus

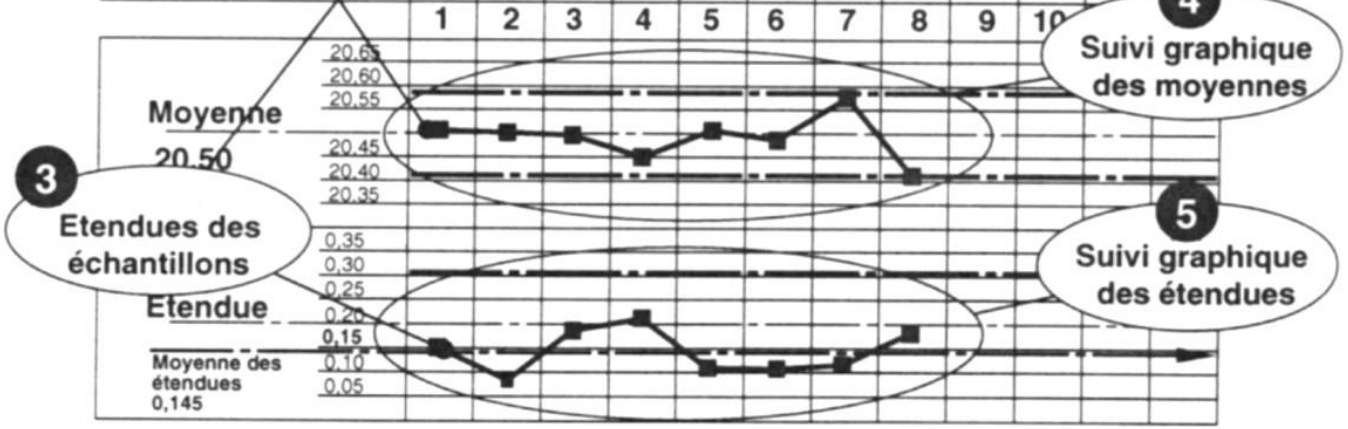
L'évolution des unités SI et leur référence



Exemples :
surveillance des paramètres de production
capteurs connectés
technologies sans contact
protocole de communication sans fil
système d'information
interface homme – machine via des outils numériques nomades
Modélisation des systèmes jumeaux virtuels

Pièce: BOUCHON	Réf : 522 B	Carte : $\bar{X}$ et W	Date : 28/1/92
Opérateur: Martin	Machine : LF 35 C	Capteur : Pied à coulisse	
Unité de mesure: mm	Limites : 20,5 +/- 0,20	Cote : Diamètre corps	

Heures de saisie	14.00	14.15	14.30	14.45	15.00	15.15	15.30	15.45	16.00	16.15	16.30
1	20,42	20,52	20,59	20,47	20,54	20,54	20,60	20,41			
2	20,50	20,56	20,54	20,51	20,49	20,53	20,54	20,40			
3	20,53	20,50	20,55	20,58	20,58	20,43	20,55	20,34			
4	20,52	20,45	20,44	20,36	20,47	20,48	20,65	20,39			
5	20,57	20,48	20,40	20,37	20,50	20,50	20,53	20,52			
Somme	102,54	102,51	102,52	102,29	102,58	102,48	102,87	102,06			
Moyenne	**20,51**	**20,50**	**20,50**	**20,45**	**20,51**	**20,49**	**20,57**	**20,41**			
Étendue	**0,15**	**0,08**	**0,19**	**0,22**	**0,11**	**0,11**	**0,12**	**0,18**			
Notes											



Exemple :

La maitrise statistique des procédés MSP, 6σ
Suivi de dispersions et plus seulement de conformité aux tolérances

Bureau International des Poids et Mesures

– l'organisation intergouvernementale dont les États Membres agissent en commun en ce qui concerne les sujets liés à la science des mesures et aux étalons de mesure.

Exemples :

Le kilogramme, kg, l'ampère, A, le kelvin, K, et la mole, mol, (mises en œuvre le 20 mai 2019)

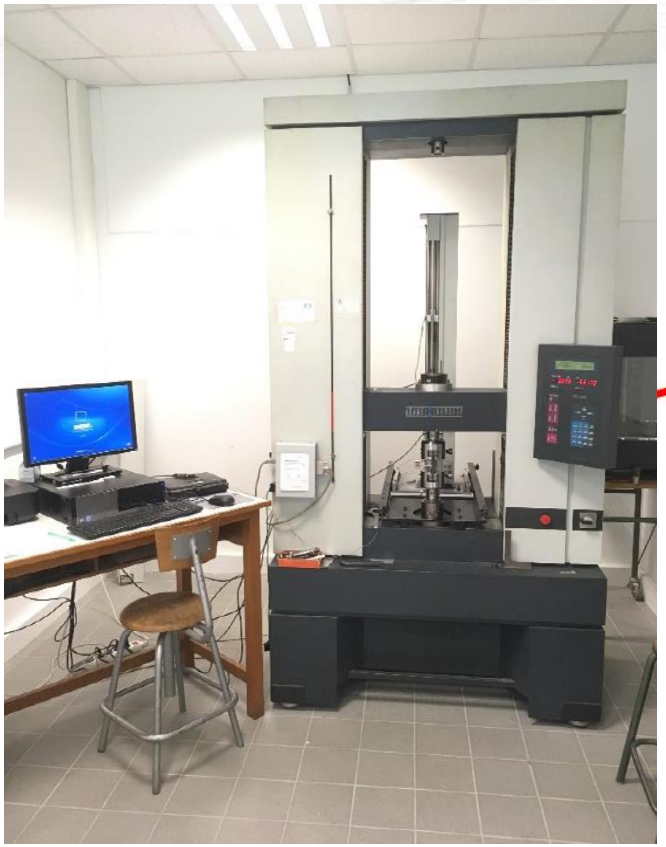
Utilisation de la résonance magnétique quantique pour assigner une valeur aux étalons de composés organiques (2018)

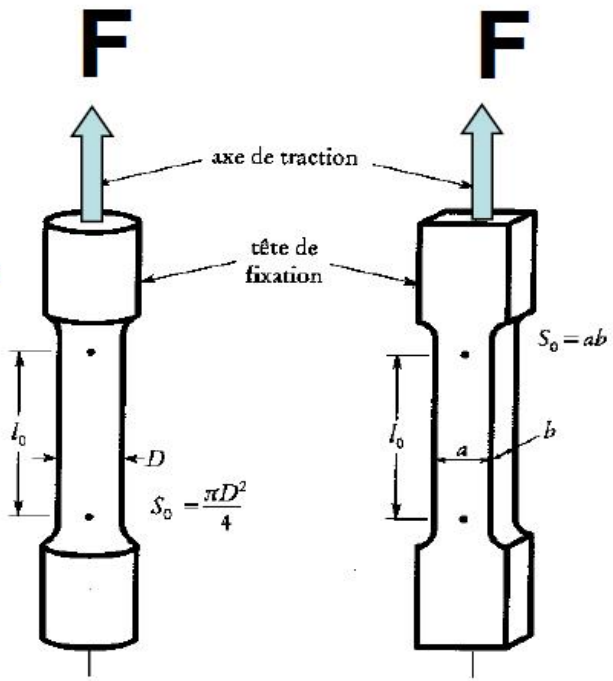
La nouvelle définition de l'unité astronomique de longueur (2012)

Instrumentation et étalonnage

Il n'y a pas de différence fondamentale dans les principes de base des mesurages en physique, chimie, biologie médicale, biologie ou sciences de l'ingénieur (VIM – BIPM - édition 2012),

Exemple fil rouge :
I2M (MM. Mondet, Coupard, Le Roux)

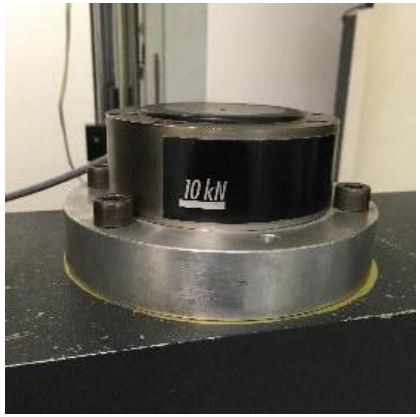




Le relevé à l'aide d'une machine de traction, de la courbe d'allongement d'une éprouvette dans un matériau donné.

Du capteur à la chaîne de mesure

Extensomètre MTS



Capteur d'effort

Capteur :

élément d'un système de mesure qui est directement soumis à l'action du phénomène, du corps ou de la substance portant la grandeur à mesurer

transducteur de mesure :

dispositif, employé en mesurage, qui fait correspondre à une grandeur d'entrée une grandeur de sortie selon une loi déterminée

chaîne de mesure :

suite d'éléments d'un système de mesure qui constitue un seul chemin du signal depuis le capteur jusqu'à l'élément de sortie

Etalonnage : du capteur à …

Etalonnage des Capteurs :

données fournies par un certificat d'étalonnage,

erreurs d'indication sur la plage de mesure

Incertitudes d'Etalonnage

ou

d'un constat de vérification

Conformité à l'Erreur Maximale Tolérée EMT

Incertitudes d'Etalonnage

Dans notre exemple :

Extensomètre, Capteur d'effort

Exemple d'Etalonnage extensiomètre

cofrac ESSAIS
Accréditation N° 1-0533
Portée disponible sur www.cofrac.fr

Valeur nominale de la longueur de base de l'extensomètre Le (mm)	50,00
Valeur mesurée de la longueur de base de l'extensomètre L'e (mm)	50,20
Erreur relative sur la longueur de base de la chaîne extensométrique (%)	0,39
Classement de la longueur de base selon la norme NF EN ISO 9513	Classe 0,5
Incertitude élargie U2 sur la longueur de base (mm)	0,083

Point de mesure N°	Déplacement donné par l'appareil d'étalonnage l (mm)		Déplacement indiqué par l'extensomètre li (mm)		Résolution de la chaîne extensométrique r (mm)	Résolution relative de la chaîne extensométrique r (%)
	Série 1	Série 2	Série 1	Série 2		
1	4,000	3,951	3,99	3,95	0,01	0,25
2	8,036	9,598	8,03	9,61	0,01	0,12
3	16,002	16,170	15,99	16,20	0,01	0,063
4	28,265	27,996	28,28	28,03	0,01	0,036
5	40,026	40,006	40,06	40,06	0,01	0,025
6	80,036	79,985	80,10	80,06	0,01	0,012
7	160,611	160,072	160,68	160,26	0,01	0,0062
8	280,02	280,81	280,18	281,16	0,01	0,0036
9	400,02	399,99	400,07	400,41	0,01	0,0025

Point de mesure N°	Erreur de justesse				Incertitude	Classe
	Série 1		Série 2			
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	NF EN ISO 9513
1	-0,010	-0,25	-0,001	-0,025	0,014	Classe 1
2	-0,006	-0,075	0,012	0,13	0,022	Classe 0,5
3	-0,012	-0,075	0,030	0,19	0,045	Classe 0,5
4	0,015	0,053	0,034	0,12	0,031	Classe 0,5
5	0,034	0,085	0,054	0,13	0,037	Classe 0,5
6	0,064	0,080	0,075	0,094	0,058	Classe 0,5
7	0,069	0,043	0,188	0,12	0,16	Classe 0,5
8	0,16	0,058	0,35	0,12	0,26	Classe 0,5
9	0,05	0,012	0,42	0,11	0,45	Classe 0,5

Exemple d'Etalonnage capteur d'effort

cofrac
ESSAIS
Accréditation N° 1-0533
Portée disponible sur www.cofrac.fr

8. ECHELLE 100 kN en Traction

Dynamomètre vérifié : MEAS type ISA3125 N° M120088 de 100 kN

8.1. Relevé de mesure

Température : 19,9 ± 2 °C

Point de mesure N°	Palier de force (kN)	Force mesurée par l'étalon de référence Fr							
		Série N° 1		Série N° 2		Série N° 3		Série N° 4	
		Indiquée	Réelle	Indiquée	Réelle	Indiquée	Réelle	Indiquée	Réelle
1	10	10,200	10,214	10,284	10,304	10,210	10,223		
2	20	20,250	20,251	20,270	20,275	20,250	20,250		
3	40	39,931	39,86	40,061	40,00	40,000	39,93		
4	60	59,836	59,70	60,000	59,87	60,003	59,88		
5	80	79,607	79,42	79,911	79,72	79,919	79,72		
6	95	93,260	92,86	94,415	94,19	94,635	94,45		

8.3. Exploitation des résultats

Point de mesure N°	Résolution (kN)	Résolution relative (%)	Erreur d'indication (%)	Erreur de répétabilité (%)	Incertitude (kN)	Classement NF EN ISO 7500-1
1	0,001	0,0098	-0,15	0,068	± 0,033	Classe 0,5
2	0,001	0,0049	-0,010	0,025	± 0,064	Classe 0,5
3	0,001	0,0025	0,17	0,016	± 0,13	Classe 0,5
4	0,001	0,0017	0,22	0,023	± 0,19	Classe 0,5
5	0,001	0,0013	0,24	0,0077	± 0,25	Classe 0,5
6	0,001	0,0011	0,29	0,24	± 0,33	Classe 0,5

Etalonnage : …. à la chaîne de mesure

Etalonnage Capteurs :

insuffisant

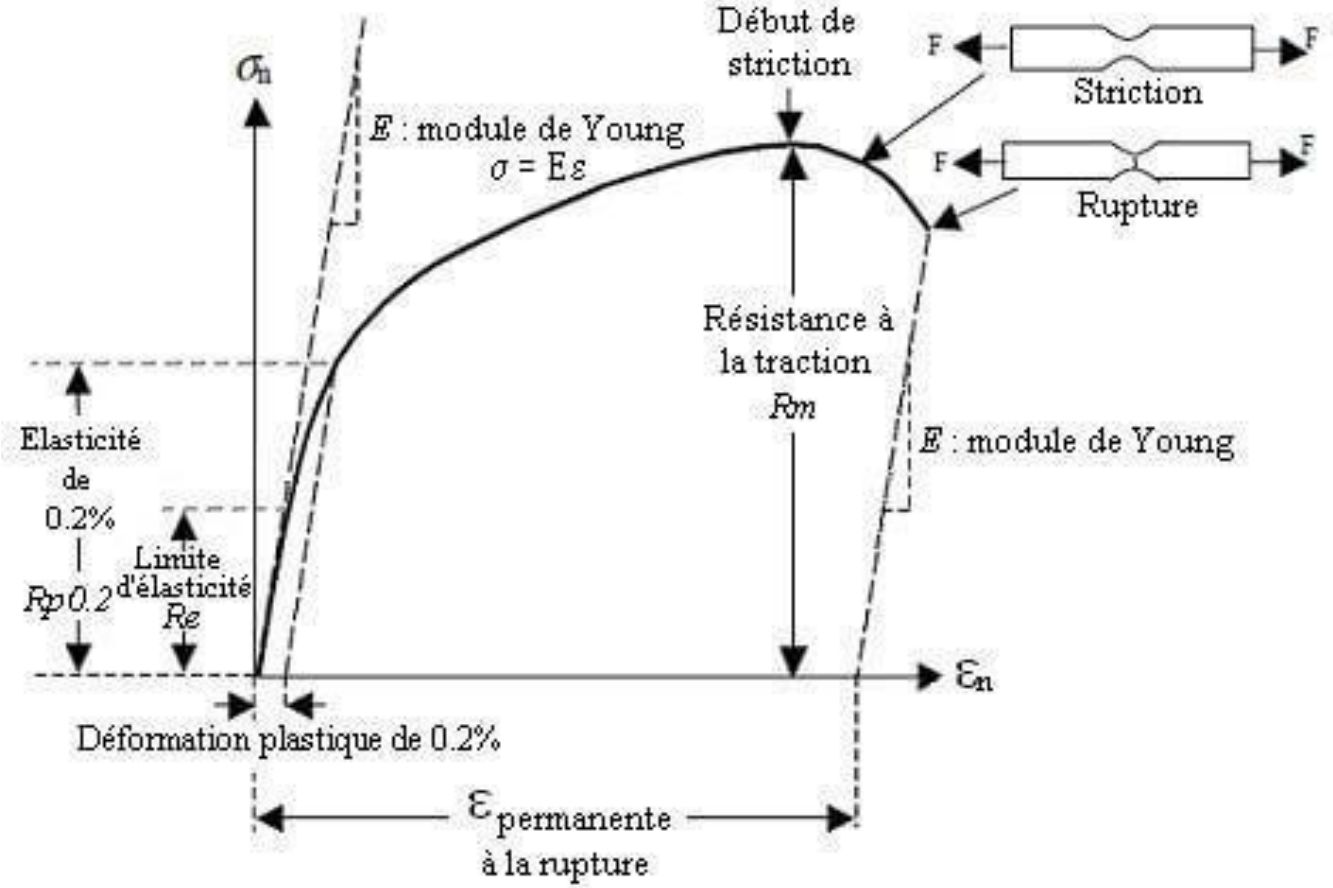
méconnaissance des conséquences sur la grandeur mesurée résultante

non prise en compte des autres composantes de la chaine de mesure; transducteur, logiciel, etc

cas des grandeurs « orphelines » : pas de raccordement possible au Système International d'Unités

RENDRE UN RESULTAT DE MESURE EN NE FOURNISSANT QUE LES CERTIFICATS D'ETALONNAGE RESTE INSUFFISANT

Cas du module d'Young et de la courbe de réponse du matériau (contrainte/déformation)



Processus de mesure et Incertitudes de Mesure

Besoin :

quantifier l'écart probable de la mesure par rapport à la valeur vraie (inatteignable) :

l'Incertitude de Mesure

L'Incertitude de Mesure doit prendre en compte les influences de tous les facteurs affectés à la mesure.

La quantification de ces Incertitudes de Mesure a donné lieu à de nombreuses publications mais également à de nombreuses normes. Les plus répandues étant :

les normes de la série NF EN ISO 14253,

le guide pour l'expression des Incertitudes de mesure (GUM-BIPM) ISO Guide 98-3.

Démarche générale d'évaluation de l'Incertitude de Mesure

PRINCIPE SIMPLIFIE - processus de mesure direct -

Modélisation du processus de mesure → Identification des facteurs d'influence → Facteurs dont l'influence est assignable → Modélisation de la correction appliquée à la mesure brut

Facteurs dont l'influence est quantifiée par analyse statistique; type A → Test de répétabilité à définir; quantification par l'écart type S

Facteurs dont l'influence est quantifiée par d'autres méthodes; type B → Quantification facteur par facteur de l'erreur et/ou de la méconnaissance de l'erreur : écart type équivalent Ui

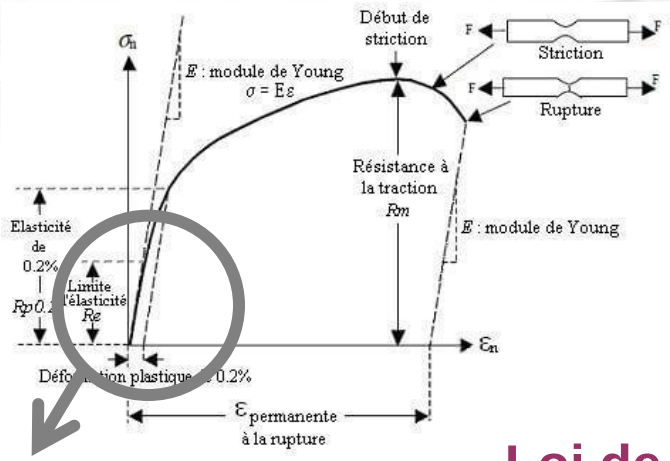
Ecart type composé ou Incertitude type :

$u_c^2 = S^2 + \sum ui^2$

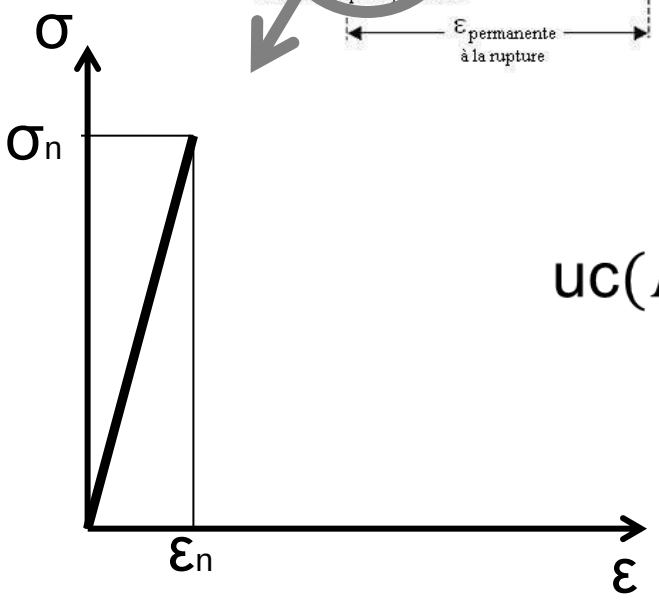
Incertitude de mesure :

$U = k\, u_c$ et $IM = \pm U$

Incertitudes de Mesure sur le Module d'Young *E*



$$E = \frac{\sigma n}{\varepsilon n}$$



Loi de propagation des incertitudes

$$uc(E)^2 = \left[\frac{\partial E}{\partial \sigma n}\right]^2 uc(\sigma n)^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \varepsilon n}\right]^2 uc(\varepsilon n)^2$$

Les résultats peuvent varier de 5% à 15% d'IM relative sur la connaissance du module d'Young

Limites de la démarche générale

Les problèmes posés par :

L'absence de raccordement au Système International d'unités,

La difficulté à modéliser les influences des facteurs et leurs interactions,

La difficulté à maîtriser répétabilité et reproductibilité

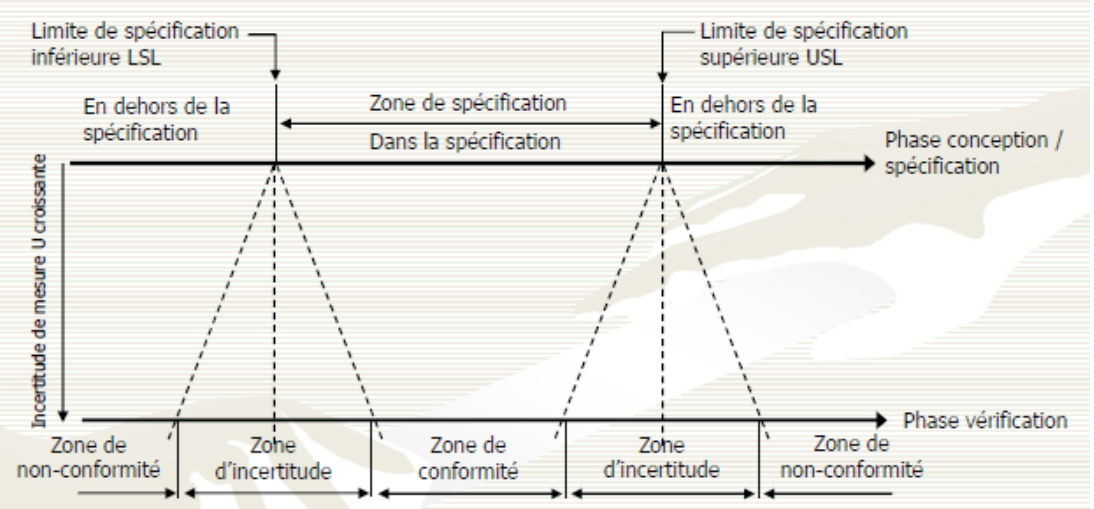
Etc

Ont nécessité des approches différentes et/ou complémentaires :

- **méthode Monté Carlo (norme FD X07-023)**
- **plans d'expérience (norme FD X06-081)**
- **comparaisons inter-laboratoires (normes ISO 5725 [1-6])**

Exploitation de l'Incertitude de Mesure

Dans le cas de la vérification de conformité (ISO 14253-1) :



Dans le cas de la caractérisation d'un mesurande en vu de modélisation ou de calage de modèle il est nécessaire de prendre en compte les IM pour la définition d'un modèle aux dispersions

Conclusions provisoires

Il est admis, aujourd'hui, que la maitrise d'une mesure ne peut se limiter à l'étalonnage de capteurs.

Les procédures associées à l'évaluation des Incertitudes de mesure doivent se généraliser dans l'industrie et les laboratoires et sont en évolution constante.

Celles-ci nécessitent une vigilance constante pour,

d'une part, une quantification fiable des IM

et d'autre part, une maitrise des risques dans les exploitations et décisions qui en découlent lors de la modélisation.

Conclusions provisoires

Il est donc nécessaire au-delà de la maitrise des instruments de mesure,

De maitriser les mesures

Dans un monde qui utilise de plus en plus la mesure pour :

Commander les systèmes

Modéliser les systèmes

Simuler les systèmes

L'évolution de l'instrumentation et de la Métrologie est un enjeu majeur pour l'avenir…

MERCI DE VOTRE ATTENTION

Pascal LE ROUX
Arts et Métiers ParisTech Bordeaux
Membre du Pôle Aquitain de Métrologie

Développement d'acquisition de données d'un anémomètre sur carte Arduino

Muriel LAGAUZERE, Gabriel MOREAU, Cyril AZZOLINA

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LEGI, 38000 Grenoble

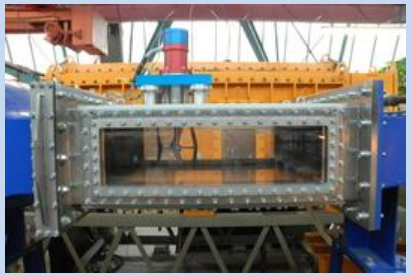
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI)

Service instrumentation / Service informatique

Contexte LEGI

Laboratoire en **mécanique des fluides** ayant une forte connotation **expérimentale** (grands équipements).
130 personnes dont la moitié de permanents

Soufflerie
16m *5m*2,6m



Tunnel de cavitation
130m³

Coriolis
13 m de diamètre

Canal à houle
36 m de long

Pilotage d'organes de contrôle

Développement de programmes d'acquisition et de contrôle commande

Acquisition de données, métrologie

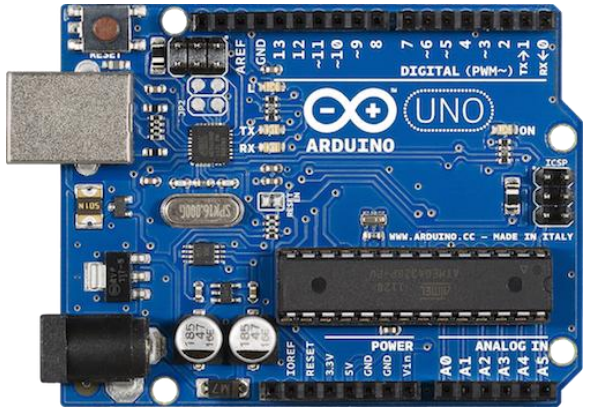
Développement d'acquisition de données d'un anémomètre sur carte Arduino

- Etude en collaboration entre le service instrumentation et le service informatique

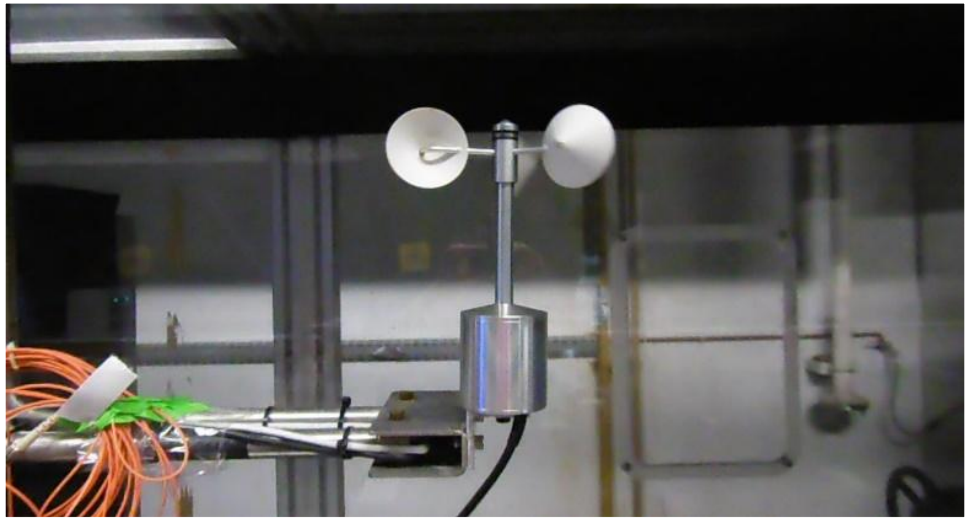
- Développer un moyen d'acquisition complémentaire aux nombreux systèmes d'acquisition de données réalisées au laboratoire

Matériel utilisé

- Kit Arduino Uno



- Anémomètre à coupelles :
  - Alimenté par l'Arduino
  - Sortie impulsion



Qu’est-ce que Arduino ?

Cartes avec microcontrôleur programmable (Atmel)

16 modèles différents

Utilisation : domotique, informatique embarquée …

Langage de programmation : C et C++

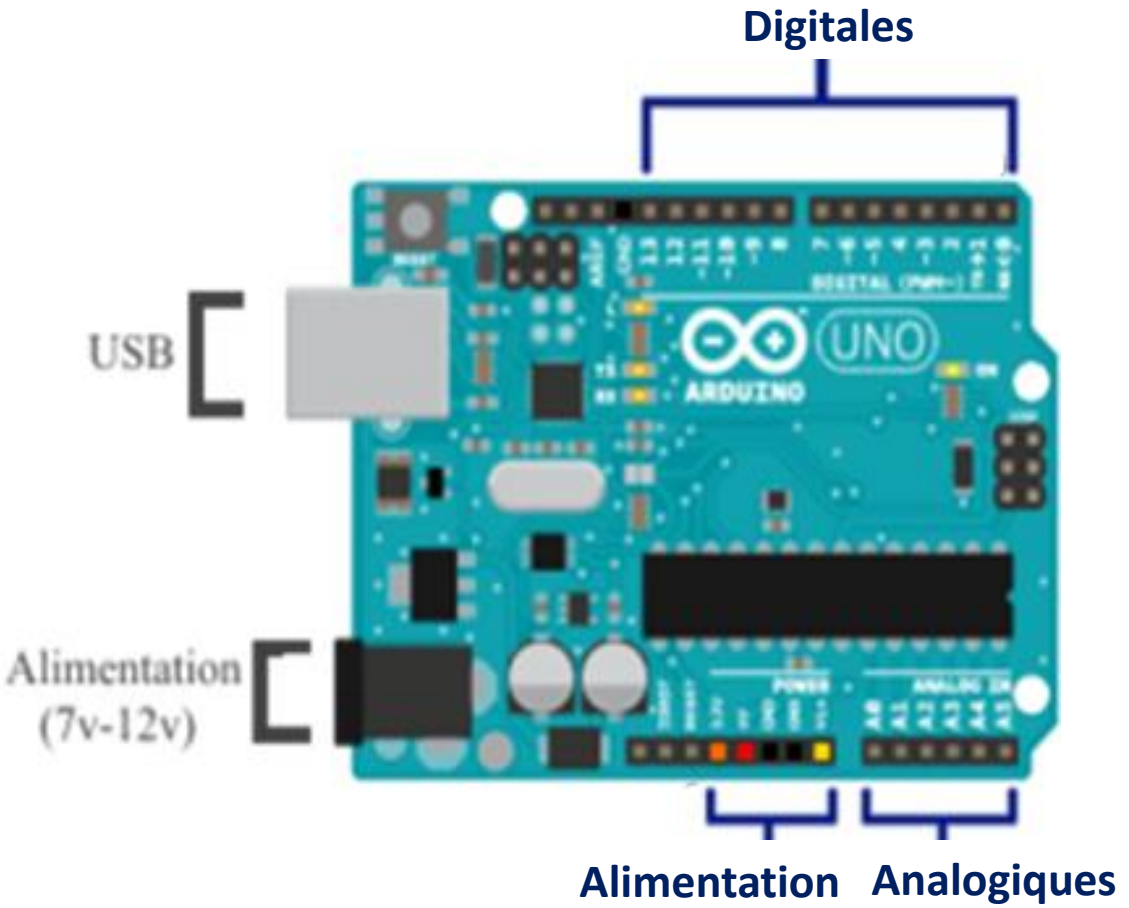
Environnements : multi-plateforme

Carte Arduino Uno

- Port USB
- Alimentation 7-12V (limites : 6-20V)

Facultative, utilisée pour alimenter l'anémomètre

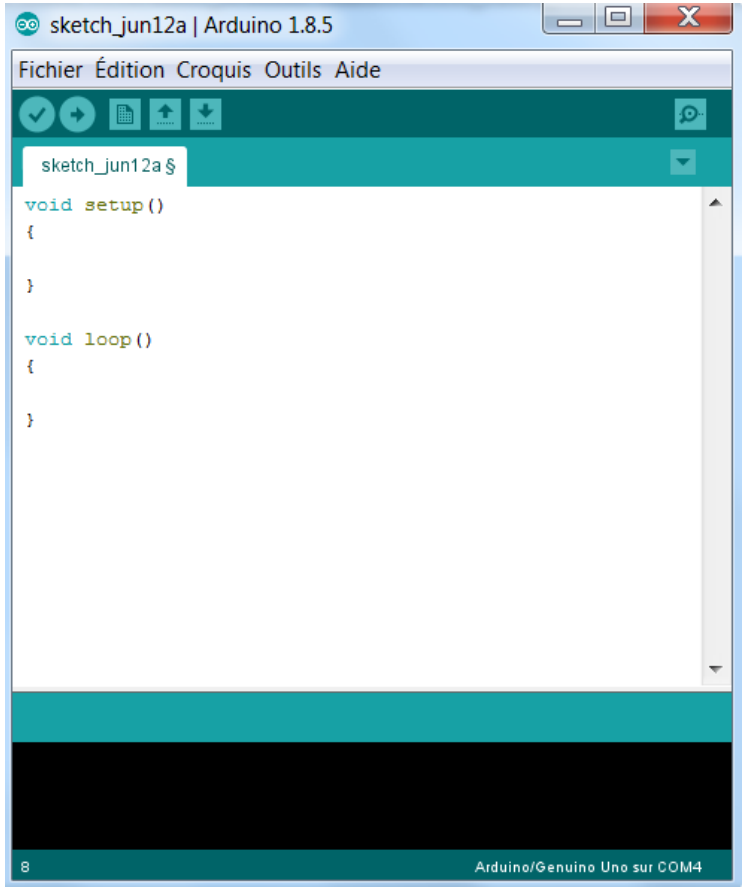
- 14 entrées-sorties digitales (dont 6 PWM)
- 6 entrées-sorties analogiques
- Courant : 20mA par entrées-sorties



Logiciel Arduino et bibliothèques

- Logiciel Arduino :
  - Compatible avec Windows, Mac OS et Linux
  - Présence d'un moniteur série et traceur série
  - Fonctions obligatoires : setup() et loop()

- Bibliothèques libres d'utilisation



L'anémomètre à coupelles

- Alimentation :
  - Plage d'alimentation : 6,5-28V
  - Pile 9V (+ adaptateur) sur pin Vin de la carte Arduino

- 2 signaux de sorties différents :
  - Analogique entre 0-2,5V pour 0-150Kts (nœuds)
  - Pulsé entre 0-1500Hz pour 0-150Kts

  (1kt = 0,514 m/s)

- Choix pour le signal pulsé (meilleure résolution)
  - Lecture des fronts montants

Le module d'acquisition de vitesse du vent

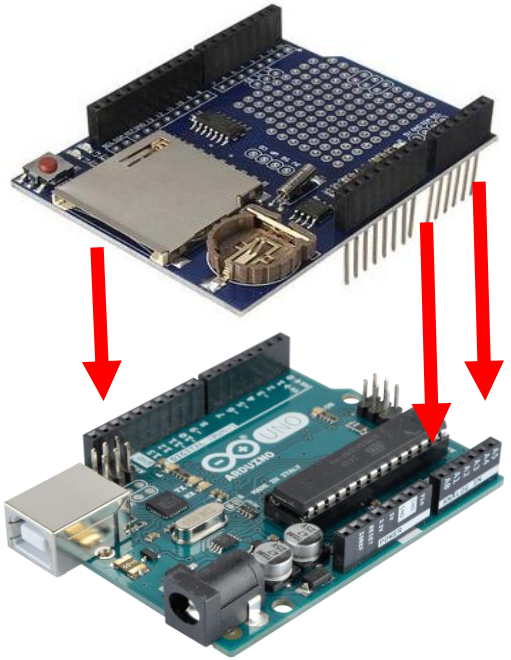
Version finalisée : Carte SD, Liaison radio, Bouton reset
Connectique DIN vers Anémomètre

Stockage des données

- Par défaut, mémoire EEPROM (1024 octets)
  bibliothèque <EEPROM.h>

- Ajout d'un shield SD (carte 4GO)

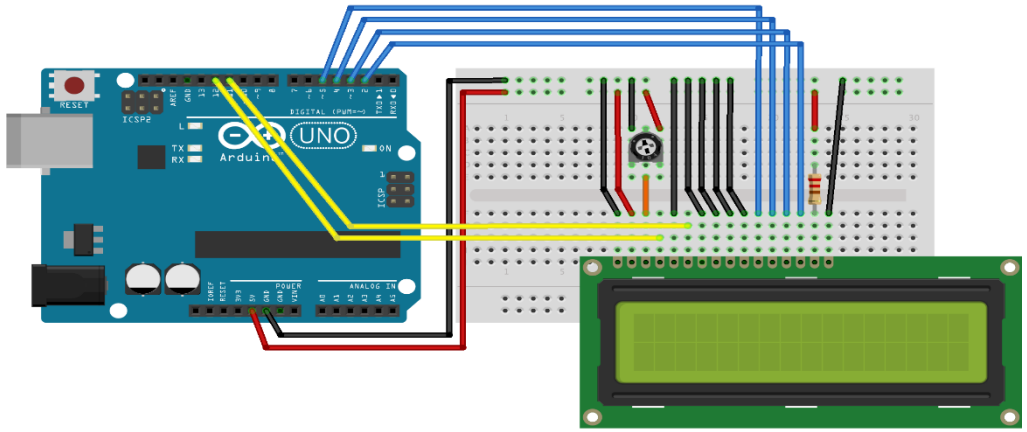
Communication avec la carte Arduino via le bus SPI (bibliothèques <SPI.h> et <SD.h>)



Enregistrement de plusieurs heures

Affichage des données

- Utilisation d'un afficheur LCD 2x16
- Bibliothèque `<LiquidCrystal.h>`
- Différents affichages :
  - Initialisation réussie ou pas de la carte SD
  - Ouverture et fermeture de fichier
  - Temps écoulé (1ère ligne) et vitesse du vent (2ème ligne)



La soufflerie à bas niveau de turbulence

Grand équipement du laboratoire :

- Encombrement : 16 x 5 x 2.5 m^3
- Veine d'essai : 4 m de long (section carrée : 0,75x0,75m2)
- Vitesse max : 45 m/s dans la veine d'essai
- Intensité turbulente : moins de 0,1%.

PRESENTATION POSTER

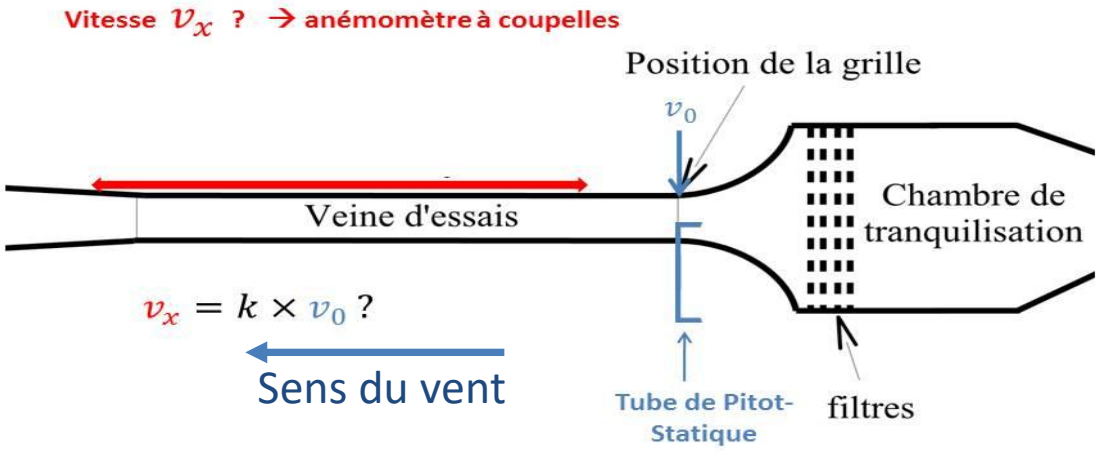
Mesures réalisées dans la soufflerie

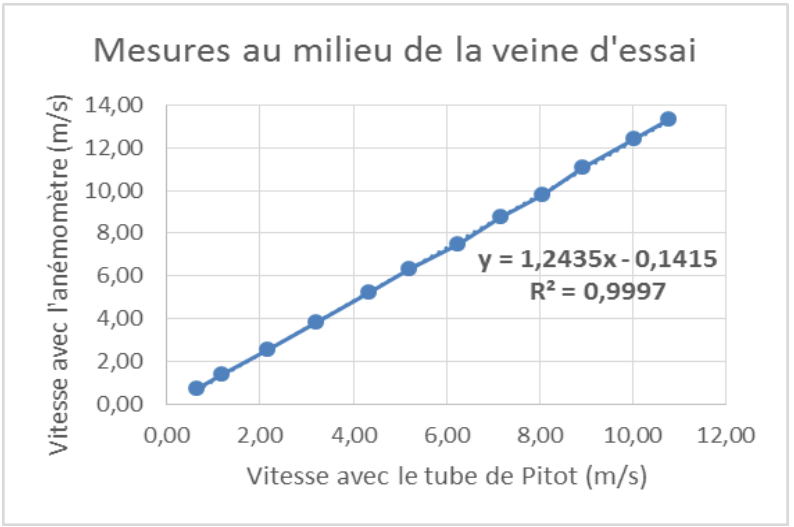
- Calibration du tube de Pitot avec un calibrateur de la vitesse de l'air

- Le tube de Pitot est positionné dans le convergent de la soufflerie

- L'anémomètre à coupelles est placé dans la veine d'essai et peut être déplacé grâce à un système 3D de déplacement.

Comparaison tube de Pitot / anémomètre à coupelles



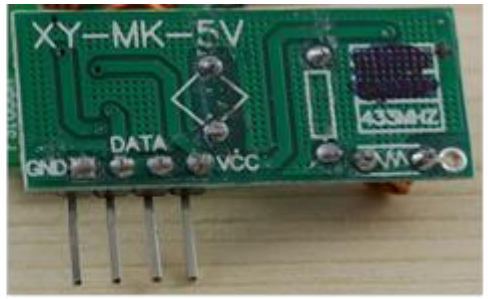


- Ecart de 20% prévu dans les mesures (positionnement différent des deux capteurs).
- Ecart comparable à celui qui était observé lors d'une étude précédente (acquisition de l'anémomètre sur carte NI).

VALIDATION DE L'ACQUISITION ARDUINO

Communication radio

Émetteur



Récepteur

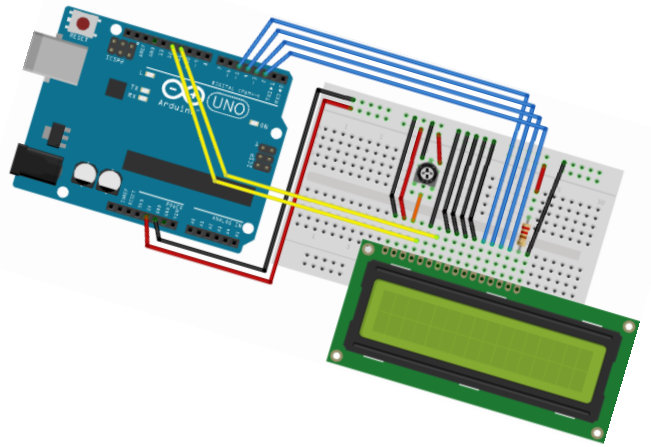
- Module émetteur (433 MHz) avec une antenne émettrice
- Module récepteur avec une antenne réceptrice (fils électriques 173 mm)

- Tests concluants sur plusieurs centaines de mètres en ligne droite (traversées de cloisons).

Communication radio

- Utilisation de 2 cartes Arduino Uno et bibliothèque `<VirtualWire.h>`
- Programme émetteur :
  - Stockage du temps écoulé et vitesse du vent dans un type structuré
  - Envoi du type structuré
  - Attente de fin de transmission
- Programme récepteur :
  - Attente de réception du type structuré
  - Réception et stockage du type structuré

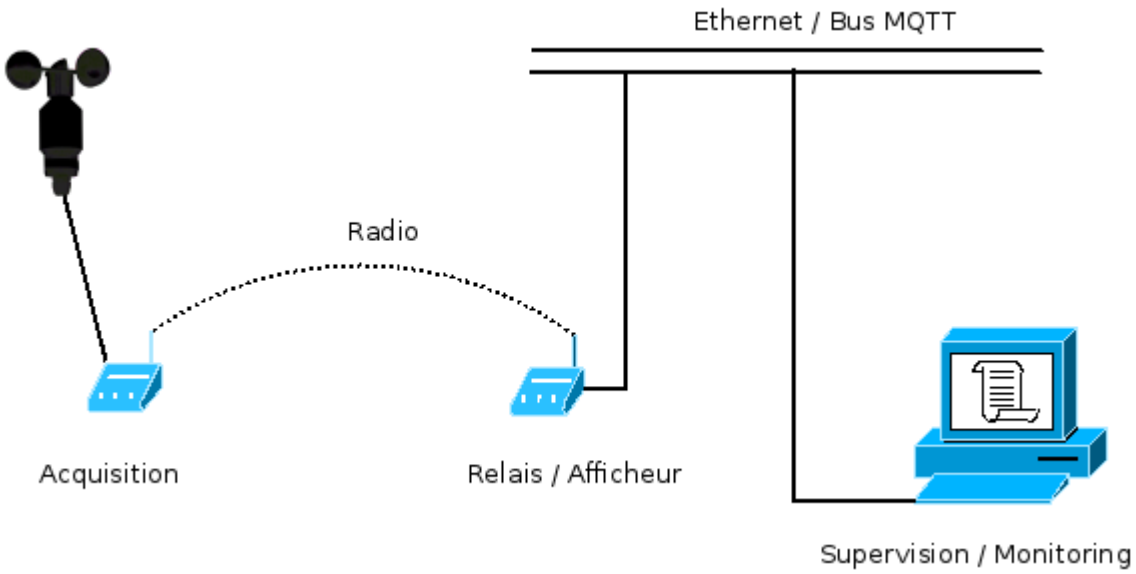
Communication radio



- S’affranchir du bruit de la soufflerie
- Surveillance de la vitesse depuis un autre Arduino fixe distant

Shield Ethernet

Supervision de l'anémomètre depuis le bureau du service instrumentation (ou de tout autre poste de travail, télévision interne…)



Shield Ethernet

Un Arduino fixe récepteur (relais) récupère les données par radio
→ renvoi sur le bus MQTT via un shield Ethernet

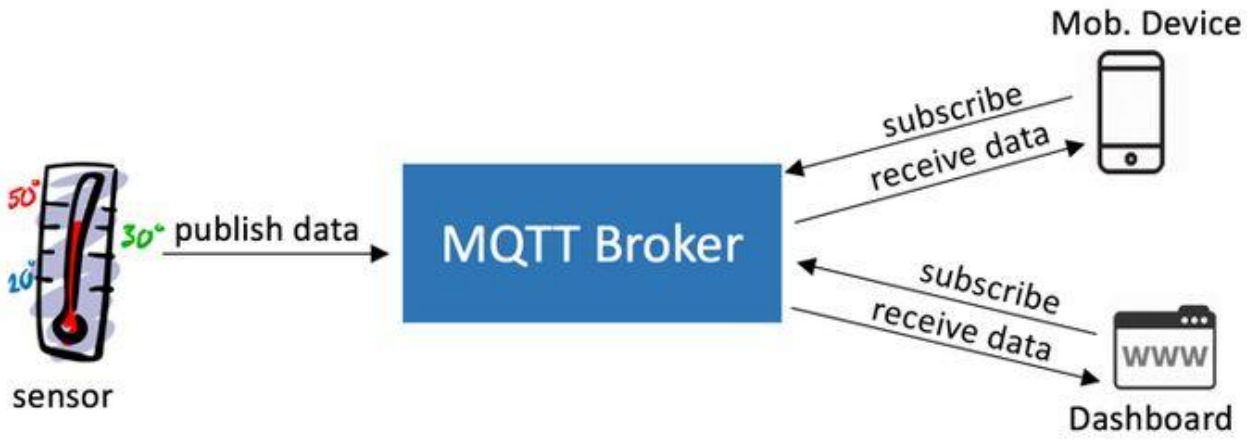
Un serveur peut récupérer ces données pour les exposer sur un site web (exemple)

Un poste utilisateur peut récupérer directement les données sur le bus

Bus MQTT

(Message Queuing Telemetry Transport)

- Protocole de messagerie basé sur le protocole TCP/IP (consomme peu d'énergie et peu de CPU)
- Très léger en bande passante (256 Mo max par message)
- API très simple à utiliser depuis l'Arduino
- Multi langage (C, C++, Python, Perl, java, PHP, Javascript…)
- Multiple implémentation → choix du serveur (broker) MQTT **Mosquitto**



Serveur Mosquitto / MQTT

- Simple à installer , à maintenir, à sécuriser

- Permet d'avoir des ***topics*** dédiés (canaux de lecture / écriture)

  Exemple

  Anémomètre accès en écriture sur

  `anemometer/bucket/speed`
  `anemometer/bucket/status`

  Superviseur accès en lecture sur l'arborescence

  `anemometer/bucket/#`

Prototype Client Web léger

Une seule page web statique embarquant du code Javascript

Aucun traitement sur le serveur web

Navigateur du poste client dialogue directement sur le bus MQTT

Rafraichissement en temps réel

Supervision Web

Deux positions : rouge (arrêt), vert (rotation)

Anémomètre à godet

L'anémomètre n'est pas branché

Anémomètre à godet

Vitesse du vent 14 m/s.

Conclusion

- Matériel intéressant pour faire de l'acquisition ou de la supervision
- Facile à programmer
- Peu onéreux
- Limitation sur les performances (fréquence, nombre de voies)
- Difficultés pour synchroniser avec d'autres systèmes d'acquisition.

Perspectives

- Supervision Web des salles utilisant un laser

- Projet sur les vents catabatiques (descendant une pente)
  Arduino embarqué sur un ballon gonflé à l'hélium en haute montagne

  Données météo : pression atmosphérique, température
  Supervision de la stabilité d'un profil de température

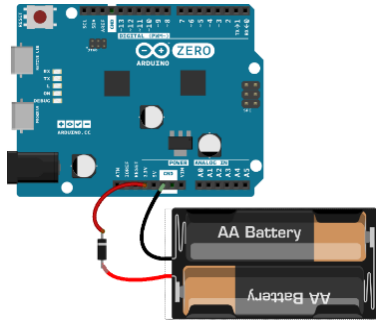
Conclusion et perspectives

MQTT

- Connexion et authentification :
  - Client crée une connexion avec le serveur :
    - Adresse du serveur
    - Port utilisé
    - Authentification : nom d'utilisateur et mot de passe
- Communication :
  - Publication, abonnement, désabonnement
  - Choix qualité de service :
    - QOS 0 : service non confirmé
    - QOS 1 : service confirmé
    - QOS 2 : service garanti
- Terminaison : déconnexion d'un publieur ou abonné du serveur

RTC

- Horloge temps réel
- Fonction : avoir la date et l'heure actuelle sur Arduino
- RTC interne (certaines cartes) ou sur un shield
- Fonctionnement :
  - Carte alimentée : RTC initialisée avec une date standard
  - Pile 3V pour maintenir la RTC si la carte n'est plus alimentée
  - Utilisation de la bibliothèque `"RTClib.h"`



Initialisation de la RTC → Configuration de la date avec celle de la compilation du programme → Vérification du bon fonctionnement de la RTC → Récupération de la date et l'heure au moment voulu

Vents catabatiques

- Données météo

Températures (profil), pression, humidité relative.

Les températures sont corrigées par rapport à la pression (températures potentielles).

Le profil de ces températures corrigées permet de voir s'il y a une stabilité ou bien une inversion de températures.

C2I 2019 **29-30 janvier 2019, Bordeaux**

Mise au point d'un banc d'étalonnage de profileurs de courant

Marc Le Menn[1], Steffen Morvan[2]

[1]Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

[2] Ecole Nationale Supérieure de d'Électrotechnique, d'Électronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications (ENSEEIHT)

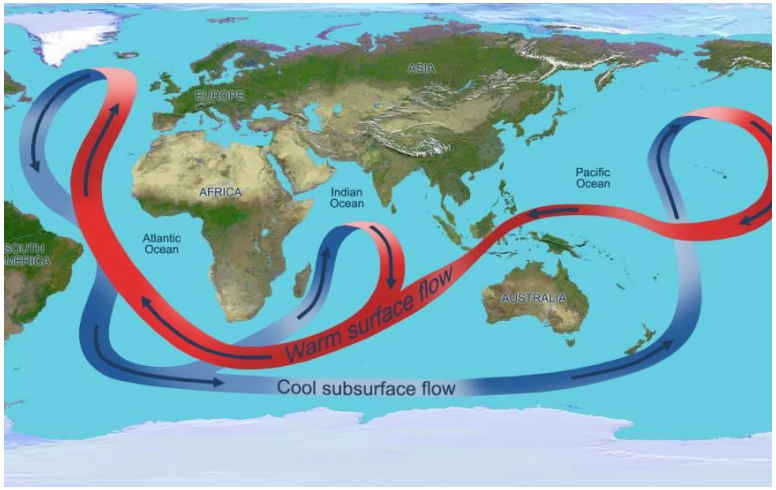
Marc.lemenn@shom.fr

1 – INTRODUCTION

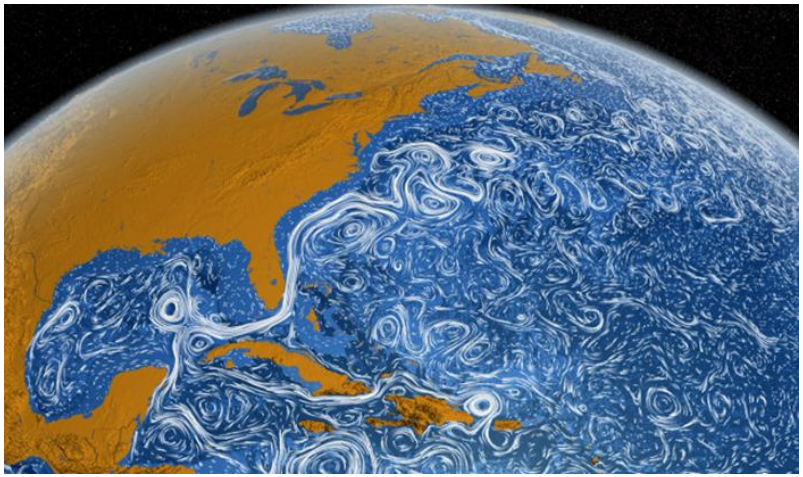
Les océans recouvrent 70,8 % de la surface du globe. Ils régulent une grande partie du climat de la Terre à travers les échanges océan – atmosphère et les phénomènes comme El-Niño, les grands cycles et courants océaniques.

La mesure des courants est essentielle pour établir des cartes utiles à la navigation, des modèles 3D de circulation océanique ou plus récemment, pour améliorer le rendement des hydroliennes et autres sources d'énergie renouvelable.

Le milieu marin est propice à la propagation des ondes acoustiques, et les courantomètres et profileurs de courant exploitent **l'effet Doppler créé par le déplacement des particules entrainées par les courants.**



Scheme of the meridional overturning circulation (MOC). Image credit: NASA/JPL.



Ocean surface large scale turbulences. Image credit: Caltech.

1 - INTRODUCTION

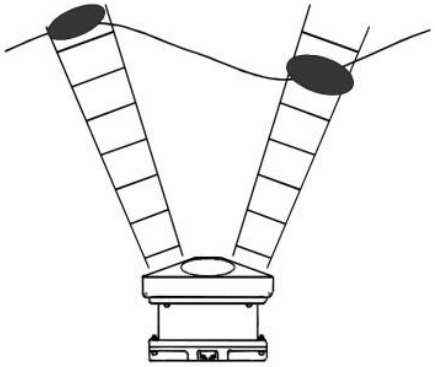
Dirigés vers le fond, ou placés dans des cages posées sur le fond et pointés vers la surface, les profileurs permettent d'obtenir des profils de vitesse de la colonne d'eau.

Leur portée, qui dépend de la longueur d'onde de la source, va de quelques mètres à plusieurs centaines de mètre, selon les charges en particules.

Ces profils sont découpés en cellules par le logiciel de l'instrument, qui fournit des valeurs de vitesses moyennes par cellule, en fonction des décalages Doppler mesurés.

Le Shom étant un organisme certifié ISO 9001, s'est posé la question de l'étalonnage de ces instruments.

Doc. Teledyne R.D. Instruments



2 – PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PROFILEURS

Les profileurs de courant mesurent des vitesses (V_1, V_2, V_3) (effet Doppler) dans l'axe de leurs faisceaux.

Leurs émetteurs sont inclinés à 20°, 25° ou 30° (angle β).

Connaissant la valeur de β, on peut calculer des vitesses (V_x, V_y, V_z) dans leur repère propre.

Ils sont équipés de compas du type '*flux-gate*' pour retrouver l'amplitude des composantes (*U, V, W*) des courants par rapport au Nord magnétique (angle Ω), puis, connaissant la déclinaison magnétique, par rapport au Nord géographique.

Ils sont, de plus, corrigés en inclinaison à l'aide de capteurs de '*tilt* ' qui mesurent les angles Ψ et θ de roulis et tangage.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3\sin(\beta)} & \frac{-1}{3\sin(\beta)} & \frac{-1}{3\sin(\beta)} \\ 0 & \frac{-1}{\sqrt{2}\sin(\beta)} & \frac{1}{\sqrt{2}\sin(\beta)} \\ \frac{1}{3\cos(\beta)} & \frac{1}{3\cos(\beta)} & \frac{1}{3\cos(\beta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\psi C_\Omega & (-S_\psi S_\theta C_\Omega + C_\theta S_\Omega) & (S_\psi C_\theta C_\Omega + S_\theta S_\Omega) \\ -C_\psi C_\Omega & (S_\psi S_\theta S_\Omega + C_\theta S_\Omega) & (-S_\psi C_\theta S_\Omega + S_\theta C_\Omega) \\ -S_\psi & -C_\psi S_\theta & C_\psi C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}$$

2 – PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PROFILEURS

Une plateforme a d'abord été construite et mise en service en 2012, pour étalonner les compas et capteurs d'inclinaison dont les courantomètres et profileurs sont dotés [1].

Il restait à trouver une méthode pour déterminer la justesse des mesures de vitesse.
Pour les courantomètres à rotor, cette détermination pouvait se faire **en bassin de traction**, par comparaison à la vitesse d'un chariot sur lequel ils étaient fixés, ou **en veine d'eau**.

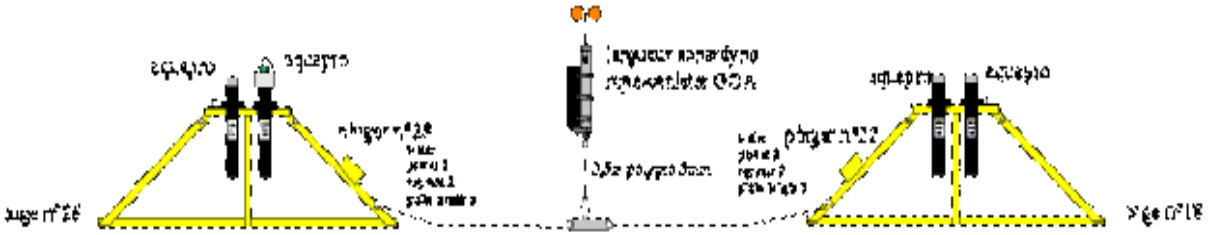
La gamme des vitesses pouvant être explorées était limitée à ± 1,0 m/s et pour les courantomètres acoustiques, la charge en particules du milieu était problématique.

Doc. © Shom

[1] - M. Le Menn, A. Lusven, E. Bongiovanni, P. Le Dû, D. Rouxel, S. Lucas, L. Pacaud, 'Current profilers and currentmeters compass and tilt sensors errors and calibration', *Meas. Sci. Technol.*, 25 (2014)

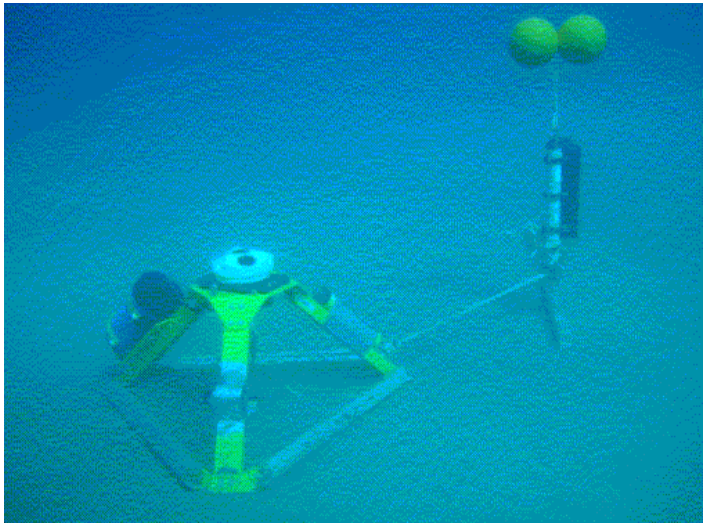
2 – PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PROFILEURS

Compte tenu de la portée des profileurs, **ces comparaisons en bassin n'étaient plus possible**.



Exemple de mouillage réalisé pour une intercomparaison. Doc. © Shom

Il restait la possibilité **d'inter-comparaisons en mer**, mais ces inter-comparaisons sont difficiles à mettre œuvre et couteuses :
Il faut trouver un endroit avec de grosses variations de courant, poser des lignes ou des cages de mouillage à partir d'un bateau, exploiter et interpréter les données …



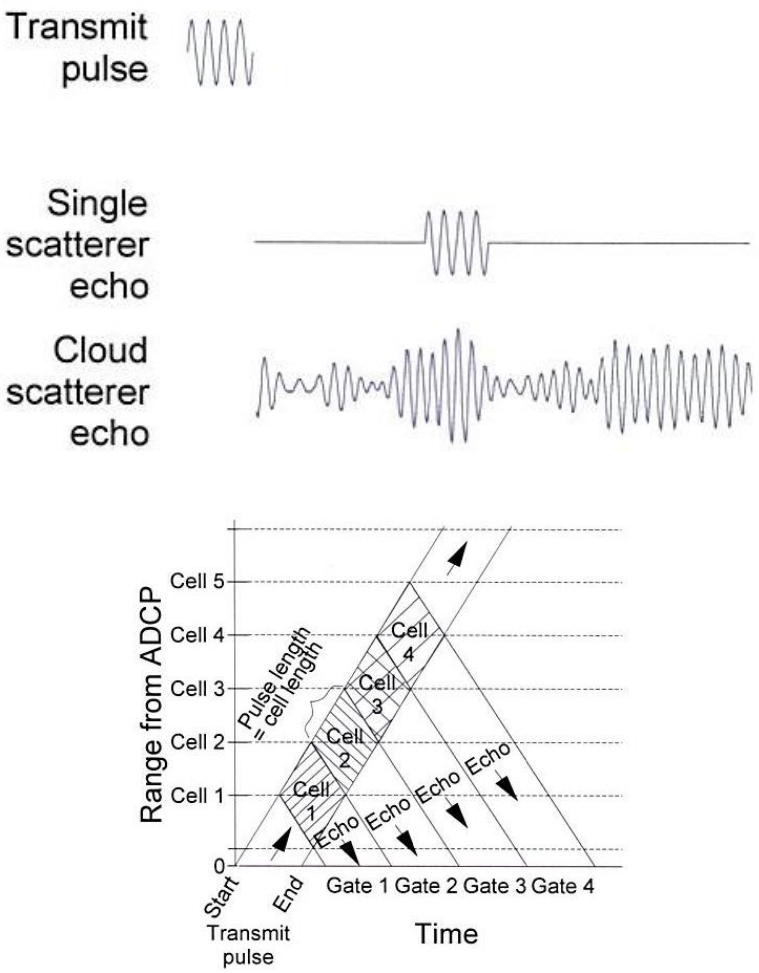
2 – PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PROFILEURS

Les profileurs conventionnels sont dits incohérents ou *narrowband* car les échos reçus de deux impulsions différentes ne sont pas corrélés.

Ces échos sont mesurés en continu, ce qui permet de déterminer la taille des cellules de mesure dans la colonne d'eau, connaissant la célérité c et la durée t_p des impulsions.

La plus faible incertitude que l'on peut obtenir sur les mesures de (V_1, V_2, V_3) est limitée par la variance du bruit Doppler σ_δ qui est inversement proportionnelle à t_p. Ce bruit est généré par le déplacement aléatoire des particules.

Pour diminuer l'incertitude, il est possible de choisir le nombre n d'impulsions / cellule.



Doc. RD Instruments, ADCP Principles of operation

2 – PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PROFILEURS

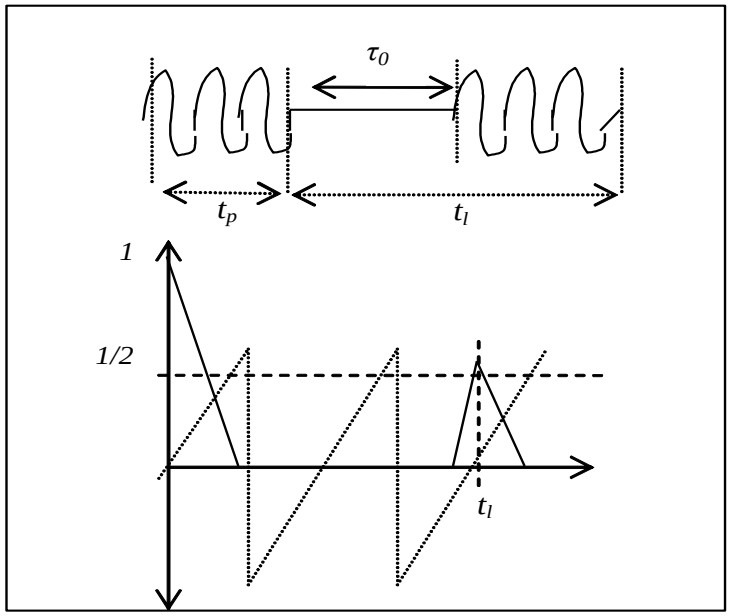
Une autre solution consiste à augmenter la valeur de t_p, mais elle conduit à réduire la résolution spatiale.

Pour surmonter cette ambiguïté, des profileurs dits '*pulse-to-pulse coherent*' ou '*pulse coherent*' ont été mis au point.

Ils consistent à travailler sur des séries de deux impulsions cohérentes, puis à calculer leur fonction d'autocovariance $R(\tau)$.

Une autocovariance moyenne est estimée à partir de la réception de M séquences de deux impulsions et de la moyenne de M fonctions $R(\tau)$ [2].

Le décalage Doppler δf, est extrait de la phase de cette fonction moyenne.



Doc. Teledyne RD Instruments

[2] - J. Dillon, L. Zedel, A. E. Hay, 'Simultaneous Velocity Ambiguity Resolution and Noise Suppression for Multifrequency Coherent Doppler Sonar', *J. of Ocean. and Atm. Technol.*, 29, 450-463, 2012

2 – PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PROFILEURS

Si f_0 est la fréquence émise, la vitesse radiale mesurée est obtenue par la relation :

$$V_i = \pm \frac{\delta f_i c}{2 f_0}$$

ou à partir de la mesure de phase :

$$V_i = \pm \frac{\emptyset c}{4 \pi f_0 t_l}$$

t_l correspond au temps d'un aller-retour des impulsions, et $2\pi\delta f = \phi / t_l$.

Sur le plan métrologique, ce qu'il importe de connaître et de maîtriser, c'est la dérive éventuelle des mesures de fréquence ou de phase qui sont réalisées.

Cette dérive est conditionnée par l'électronique des transducteurs et la qualité de l'oscillateur qui se trouve dans l'instrument.

Il est donc nécessaire de pouvoir comparer la fréquence f_0 émise par le profileur, à une fréquence de référence.

Or, leur logiciel ne donne accès qu'aux vitesses mesurées V_i ou à celles référencées.

3 – MISE AU POINT DE LA MÉTHODE

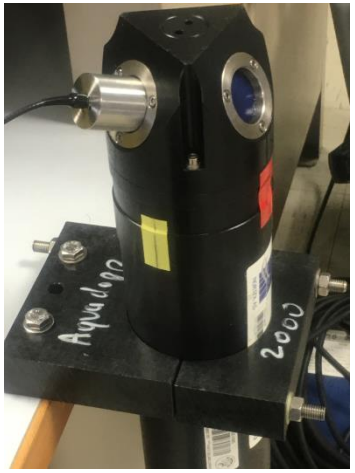
L'idée est venue d'utiliser un hydrophone raccordé à un générateur de fréquence, pour **simuler la réception d'un écho par l'instrument**.

Connaissant la fréquence f_0 du profileur, à partir des relations précédentes, il est possible de déterminer une plage de variation de fréquence correspondant à sa plage de variation de vitesse.

Il est possible également de déterminer un pas d'incrément de fréquence δf_r, connaissant la résolution en vitesse δv de l'instrument.

Le générateur est donc réglé pour envoyer une sinusoïde de fréquence variable $f_0 \pm k.\delta f_r$, la valeur de k permettant d'explorer la gamme de vitesse.

Hydrophone posé sur un profileur NORTEK 600 kHz et sur un profileur Workhorse RDI.



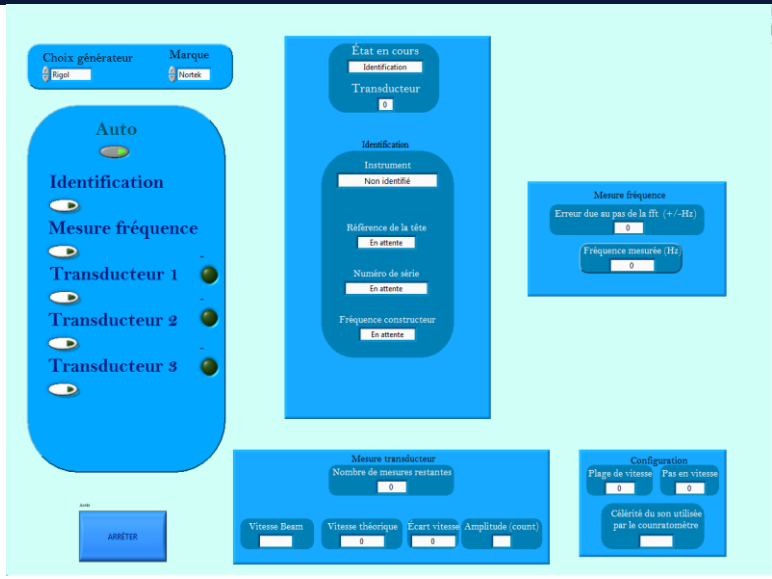
Hydrophone Ubertone sur un AQD 2000 m

3 – MISE AU POINT DE LA MÉTHODE

L'ensemble est piloté à distance par un programme développé sous le progiciel Labview.
Il permet d'automatiser le test en décodant les messages des différents types de profileurs et il permet de piloter le générateur de fréquence.

L'étalonnage consiste à calculer un écart de vitesse δv.
δv fait intervenir c, et la question s'est posée de déterminer cette valeur dans le cas de ce banc de mesure.

Après de multiples essais, sa valeur a été fixée de façon à obtenir la plage d'excursion de vitesse la plus grande possible, tout en restant compatible avec des célérités océaniques.



Face avant logiciel d'étalonnage.

$$\delta v = V_{ref} - V_i = \frac{c}{2}\left(\frac{\delta f_{ref} - \delta f_i}{f_0}\right)$$

c = 1525 m/s. Programmé dans le profileur et le prog. Labview. Permet d'explorer la gamme $\pm$ 6 m/s.

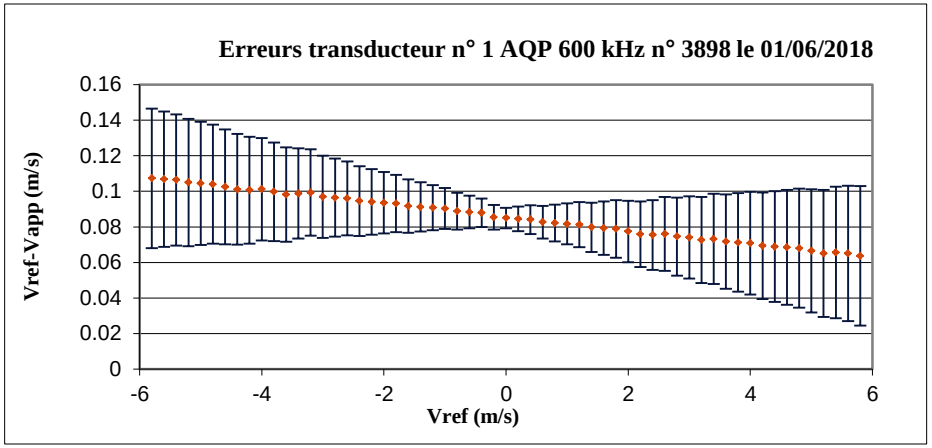
3 – MISE AU POINT DE LA MÉTHODE

Les profileurs sont configurés en fixant leur temps d'intégration à 1 s, une zone blanche minimale, une seule cellule de mesure, et mode *narrowband* (pour les Nortek).

Dans un premier temps, **la fréquence centrale** envoyée par le générateur a été fixée en fonction des fréquences sur lesquelles les profileurs étaient censés émettre : 400 kHz, 600 kHz, 1 MHz ou 2 Mhz.

Il est apparu que les courbes d'écart obtenues présentaient des offset et des pentes variables selon les instruments.

Afin de lever le doute sur l'origine de ces décalages, des mesures ont été faites en faisant varier progressivement la fréquence f_0 émise par le générateur, afin d'observer son influence sur l'offset.



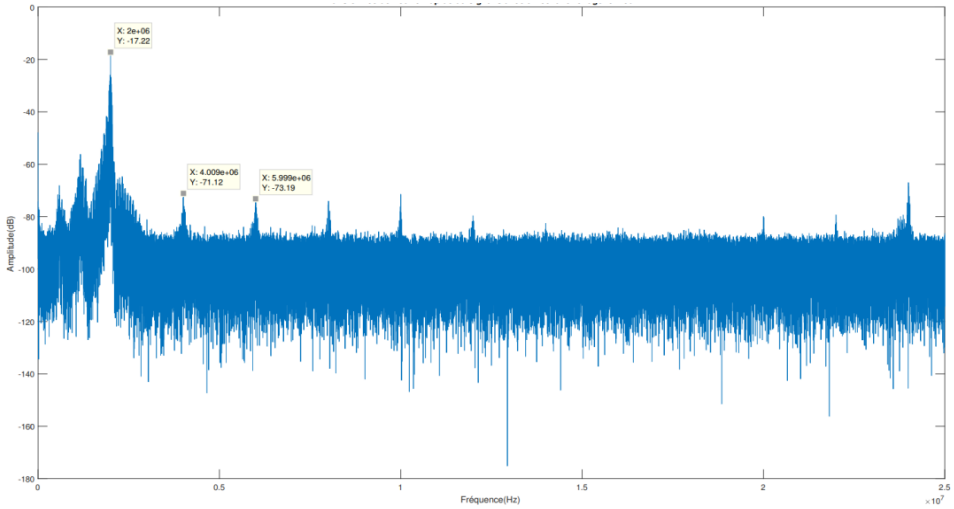
Exemple de résultat obtenu initialement.

L'influence étant notable, l'hydrophone a été utilisé en récepteur et raccordé à un oscilloscope.

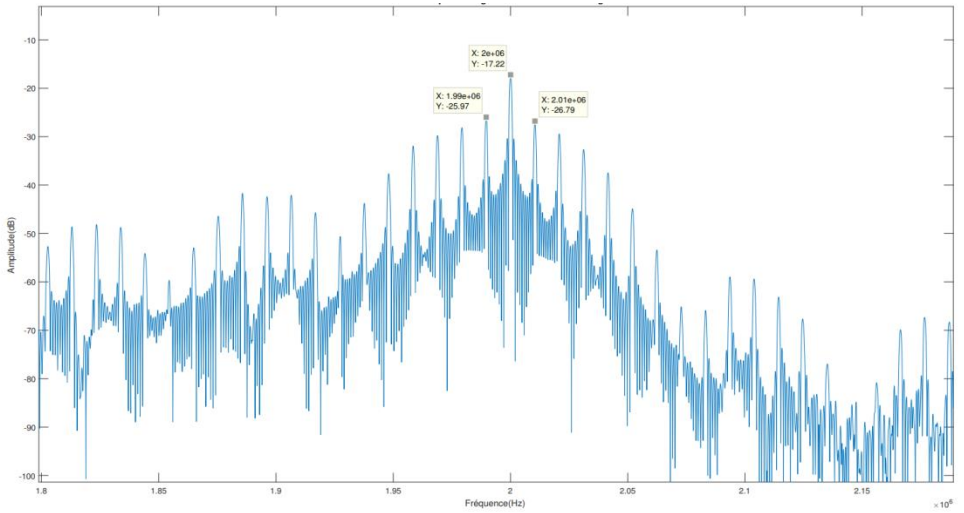
3 – MISE AU POINT DE LA MÉTHODE

L'analyse fréquentielle du signal numérisé a permis de mettre en évidence des décalages de fréquence de quelques Hz à quelques dizaines de Hz et de mesurer avec exactitude les fréquences des impulsions émises par les courantomètres.

En fait, si l'influence de la connaissance exacte de la valeur de f_0 sur la mesure de vitesse est négligeable, **durant ce test il est nécessaire de la connaître pour évaluer l'exactitude de la mesure du décalage Doppler réalisé par l'instrument**.



Spectre des impulsions émises par un profileur



3 – MISE AU POINT DE LA MÉTHODE

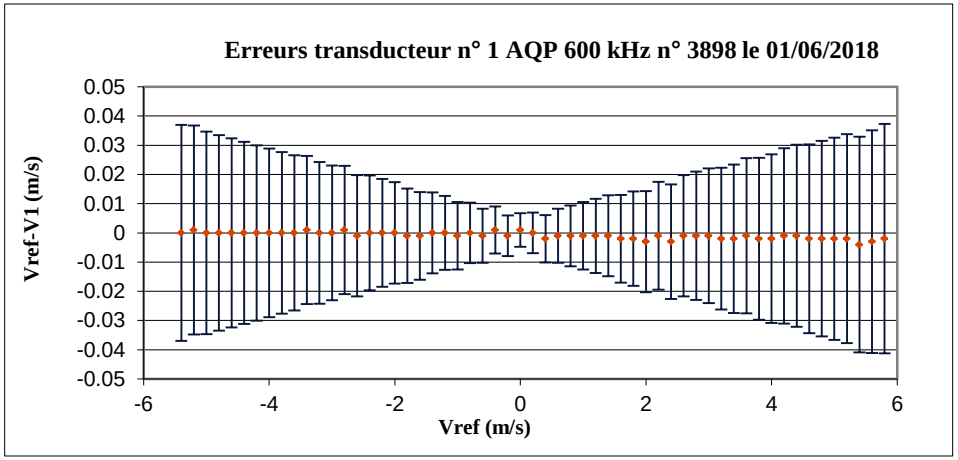
Comme on peut le voir sur les graphiques, après alignement de la fréquence émise par le générateur sur celle du profileur, l'offset et la pente disparaissent.

Les barres d'erreurs représentent **l'incertitude élargie de l'étalonnage**.

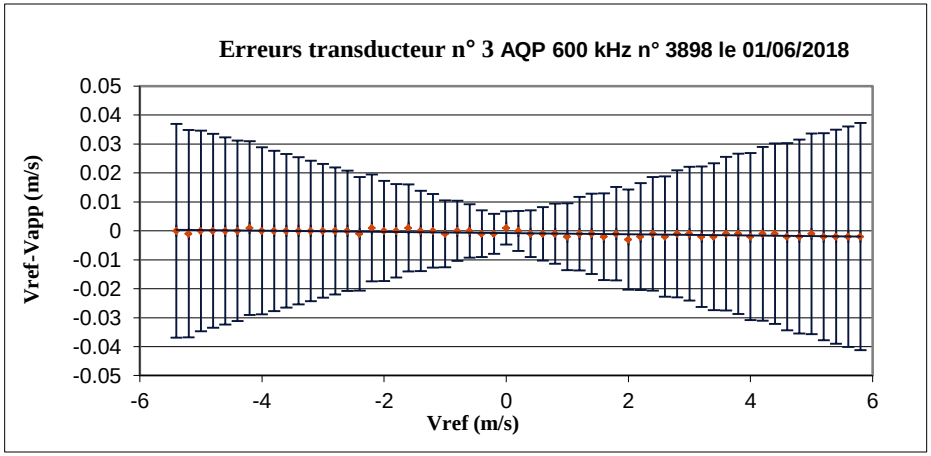
Elle prend en compte :

- l'incertitude sur l'écart de fréquence généré;
- L'incertitude sur la mesure de f_0 ;
- L'incertitude sur les vitesses et donc sur les fréquences fournies par le fabricant des profileurs.

Cette dernière domine largement les deux autres.



Exemple de résultat obtenu après ajustement de la fréquence de test.



4 – RÉSULTATS OBTENUS

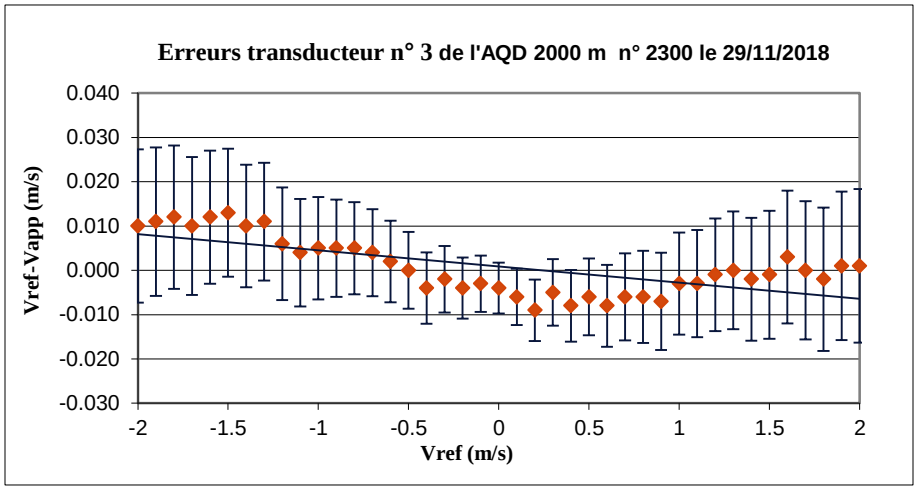
La chaine de mesure a donc été modifiée pour tenir compte de ces décalages.

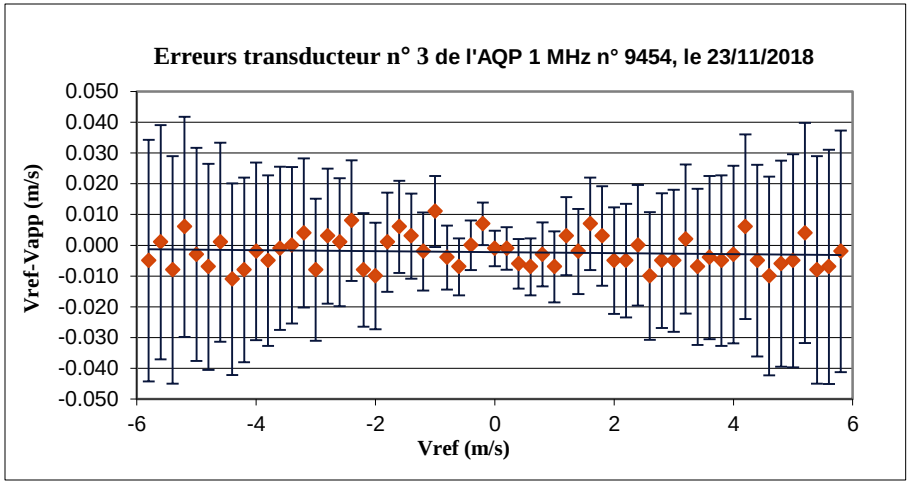
Une carte de numérisation a été achetée et raccordée à une horloge externe du type Epsilon NTP contenant un OCXO, pilotée par un signal GPS, **pour garantir son exactitude et sa stabilité**.

Comme preuve de son bon fonctionnement, ce banc a permis de mettre en évidence des défauts sur certains instruments du parc des courantomètres du Shom. Exemples :

-Le transducteur n° 3 de l'AQD n° 2300 présente une pente, faible mais anormale.

-Les trois transducteur de l'AQP n° 9454 sont bruités. Le bruit est faible mais anormal.



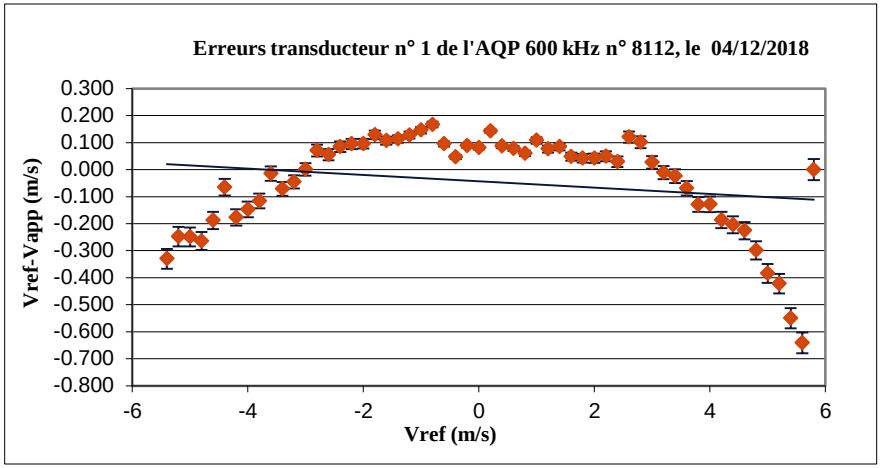


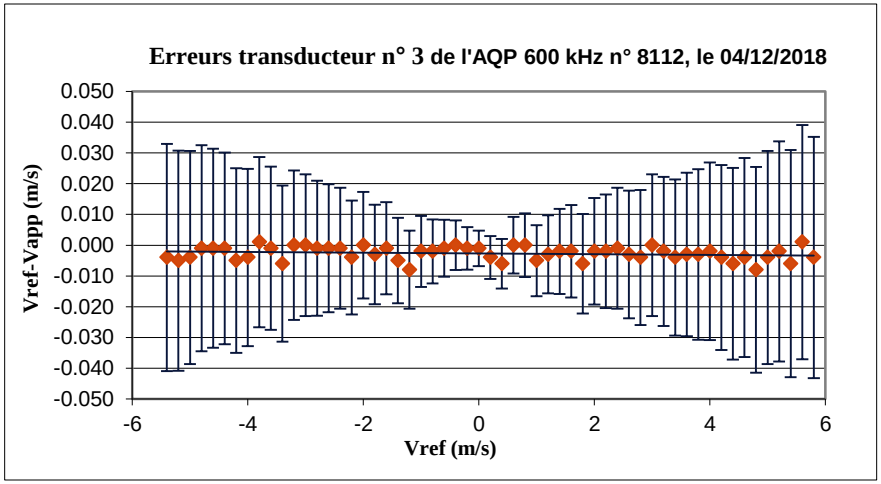
4 – RÉSULTATS OBTENUS

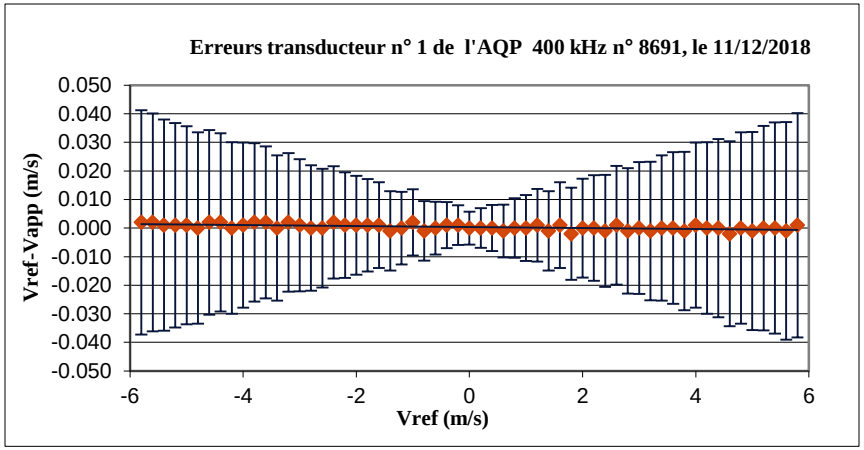
- les transducteurs n° 1 et 2 de l'AQP n° 8112 présentent un dysfonctionnement,

- Alors que le troisième transducteur de cet AQP présente des écarts dans les tolérances.

Cependant, pour la plupart des instruments testés, les écarts obtenus sont inférieurs à 5 mm/s. Exemple, AQP 400 kHz n° 8691.







5 – CONCLUSION

Les profileurs de courant sont des instruments utilisés couramment et en quantité par les organismes pratiquant de l'hydrologie fluviale ou de l'océanographie, mais ils faisaient l'objet de peu de contrôles métrologiques, en particulier à cause de la complexité de leurs algorithmes de fonctionnement.

La méthode mise au point et le logiciel d'automatisation développés, permettent d'interfacer et d'étalonner tous les profileurs et courantomètres de la gamme Nortek et une partie de ceux du constructeur RDI Instrument.

Ce banc de test et d'étalonnage a permis de mieux connaître ces profileurs de courant, et en particulier de constater que la plage de vitesse annoncée dans les spécifications des courantomètres, est minimale (elle dépend de la célérité du milieu).

Il a permis de constater également que les mesures de l'effet Doppler sont, sur la plupart des instruments, d'une grande fiabilité.

L'incertitude des mesures dépend avant tout de la célérité et des charges en particules du milieu.

MERCI !

Le système de surveillance microclimatique en continu, une aide à la gestion de la Grotte de Lascaux (Montignac)

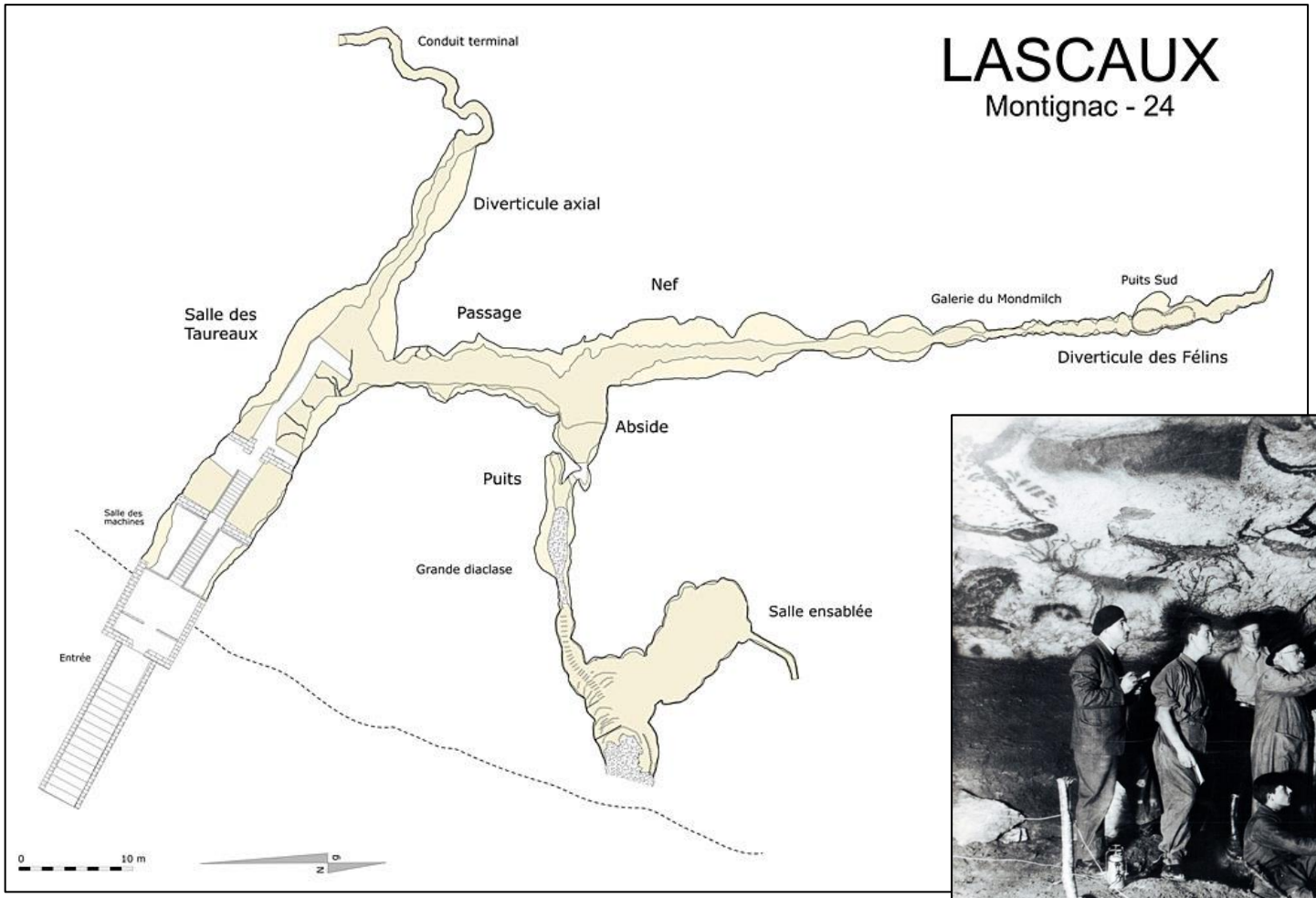
***Nicolas HOUILLON*[1], *P. MALAURENT*[1], *JC. PORTAIS*[2], *F. NAESSENS*[1], *R. LASTENNET*[1], *A. DENIS*[1].**

[1] Université de Bordeaux, I2M

[2] DRAC Nouvelle Aquitaine

INTRODUCTION GENERALE

De sa découverte (1940) à sa fermeture au public (1963) :

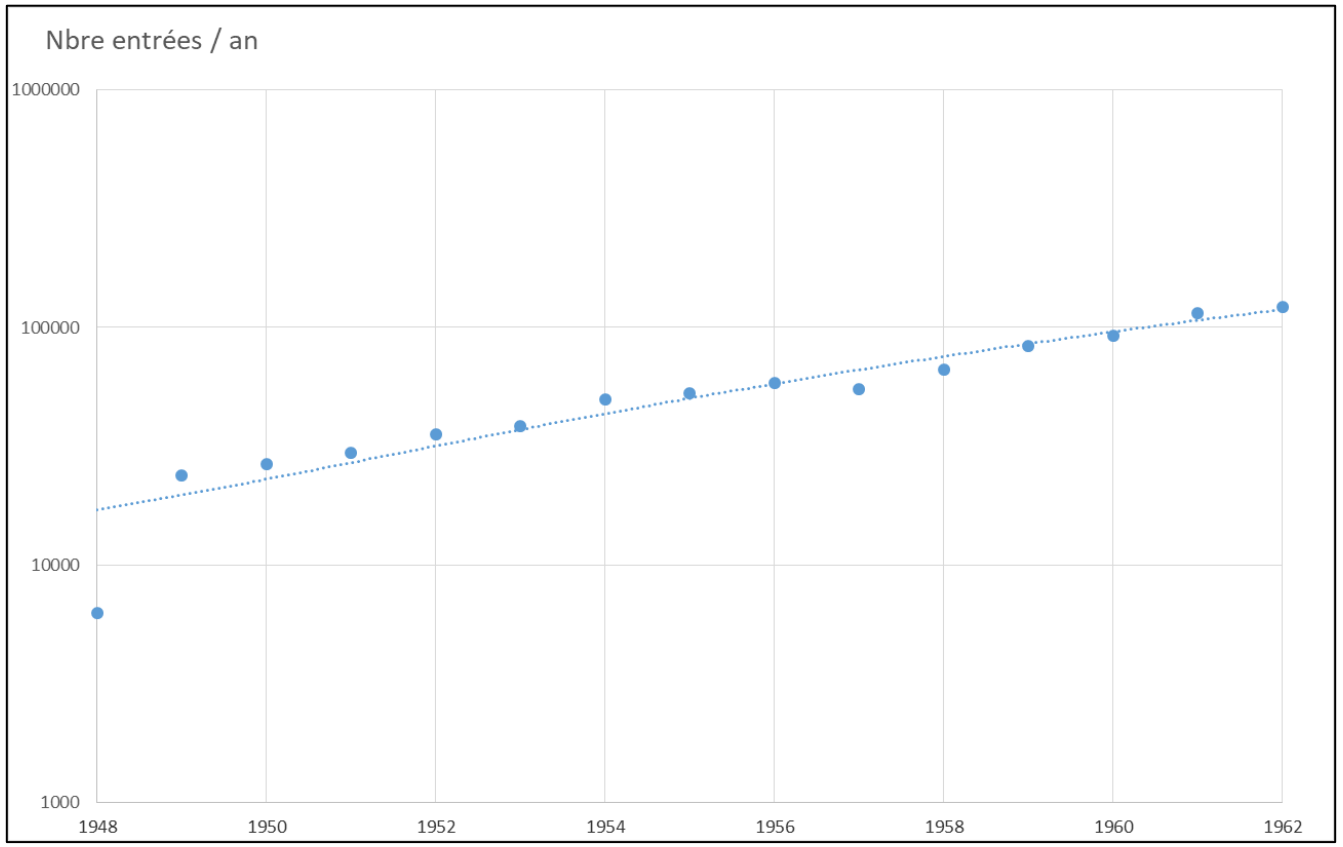


Plan actuel de la Grotte de Lascaux

Découverte de la Grotte de Lascaux (1940)

De sa découverte (1940) à sa fermeture au public (1963) :

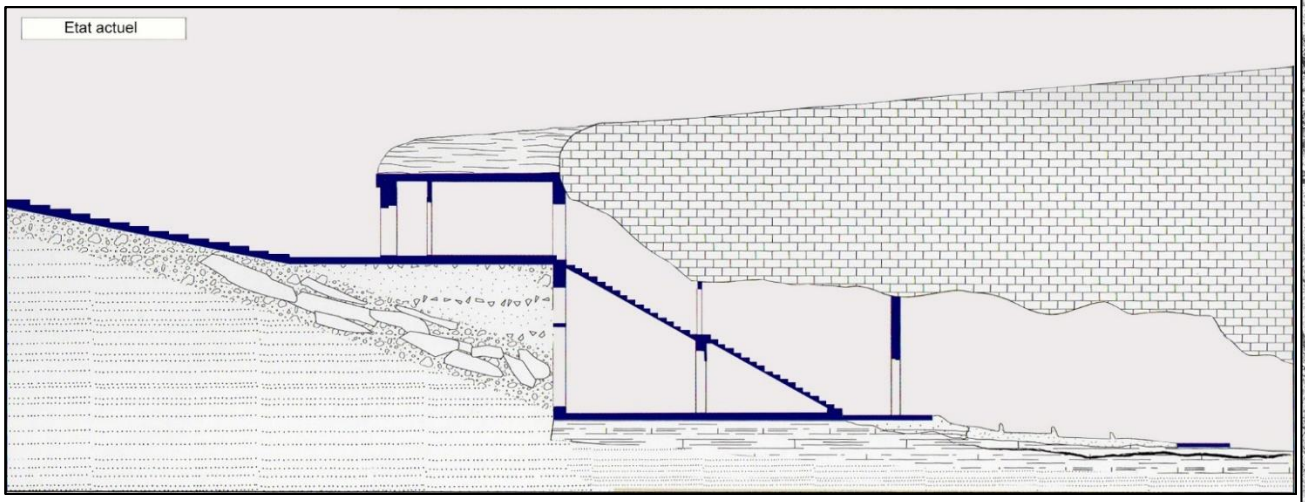
- Croissance exponentielle du nombre de visites (≈122 000 en 1962),



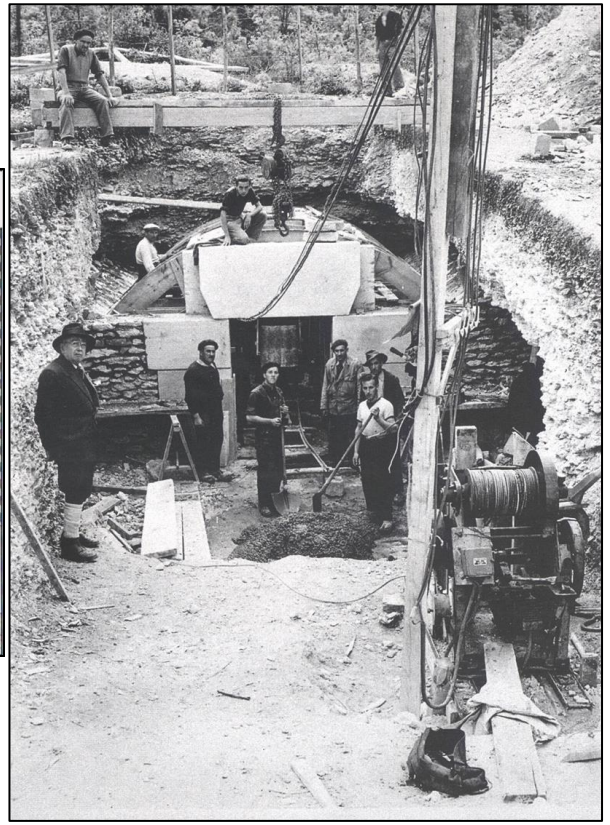
Evolution du nombre annuel de visiteurs de 1948 à la fermeture en 1963.

De sa découverte (1940) à sa fermeture au public (1963) :

- Une cavité profondément remaniée : aménagements de l'entrée (1940 à 1958)



Evolution de l'entrée de la cavité du Paléolithique à nos jours.



Terrassement (Geneste, 2009)

De sa découverte (1940) à sa fermeture au public (1963) :

- Une cavité profondément remaniée : machineries de conditionnement de l'air (contrôler l'humidité des parois).

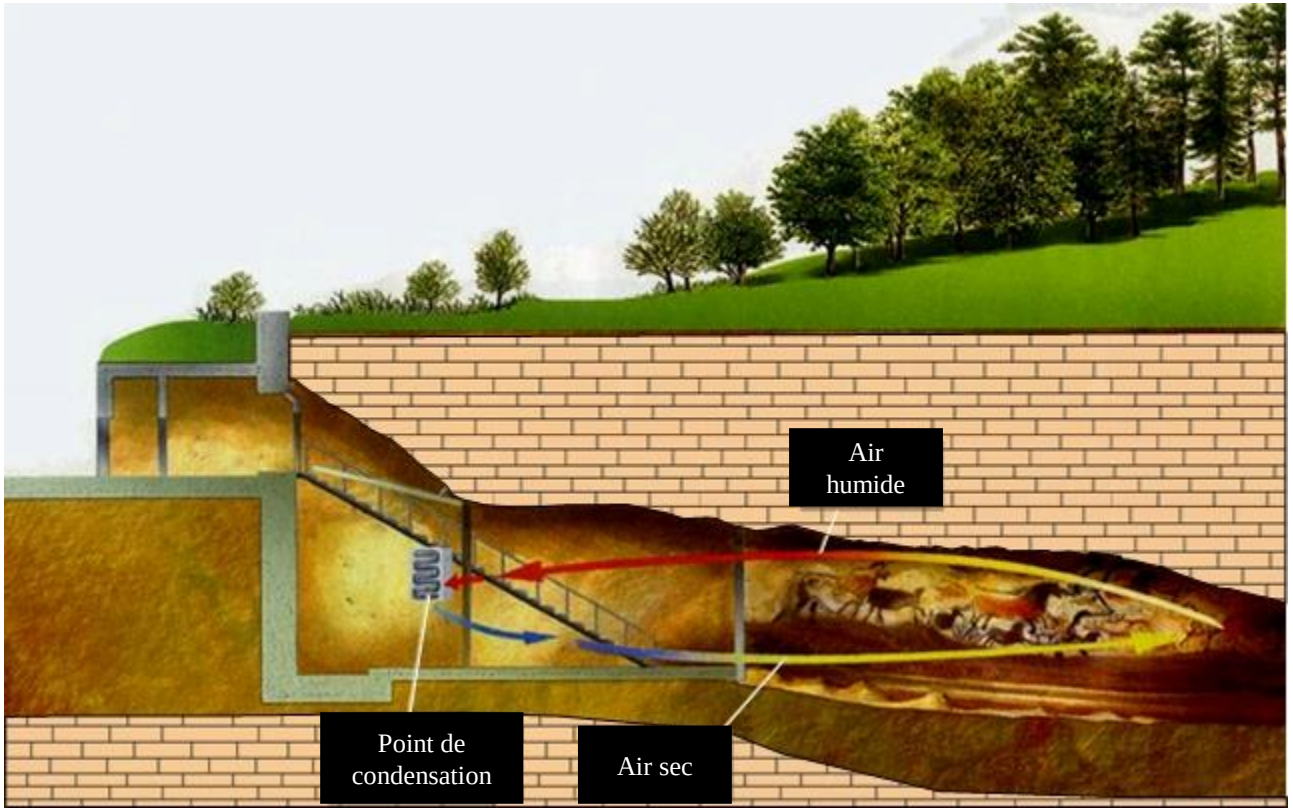


Schéma simplifié du conditionnement de l'air (modifiée d'après le Monde, 2000).

De sa découverte (1940) à sa fermeture au public (1963) :

- Apparition des premières crises bioclimatiques :
  - Maladie blanche : croissance anormale de calcite sur certaines parois (visites + machinerie),
  - Maladie verte : prolifération d'algues et de moisissures (visites).

➢ Fermeture au public par le ministre André Malraux (1963).

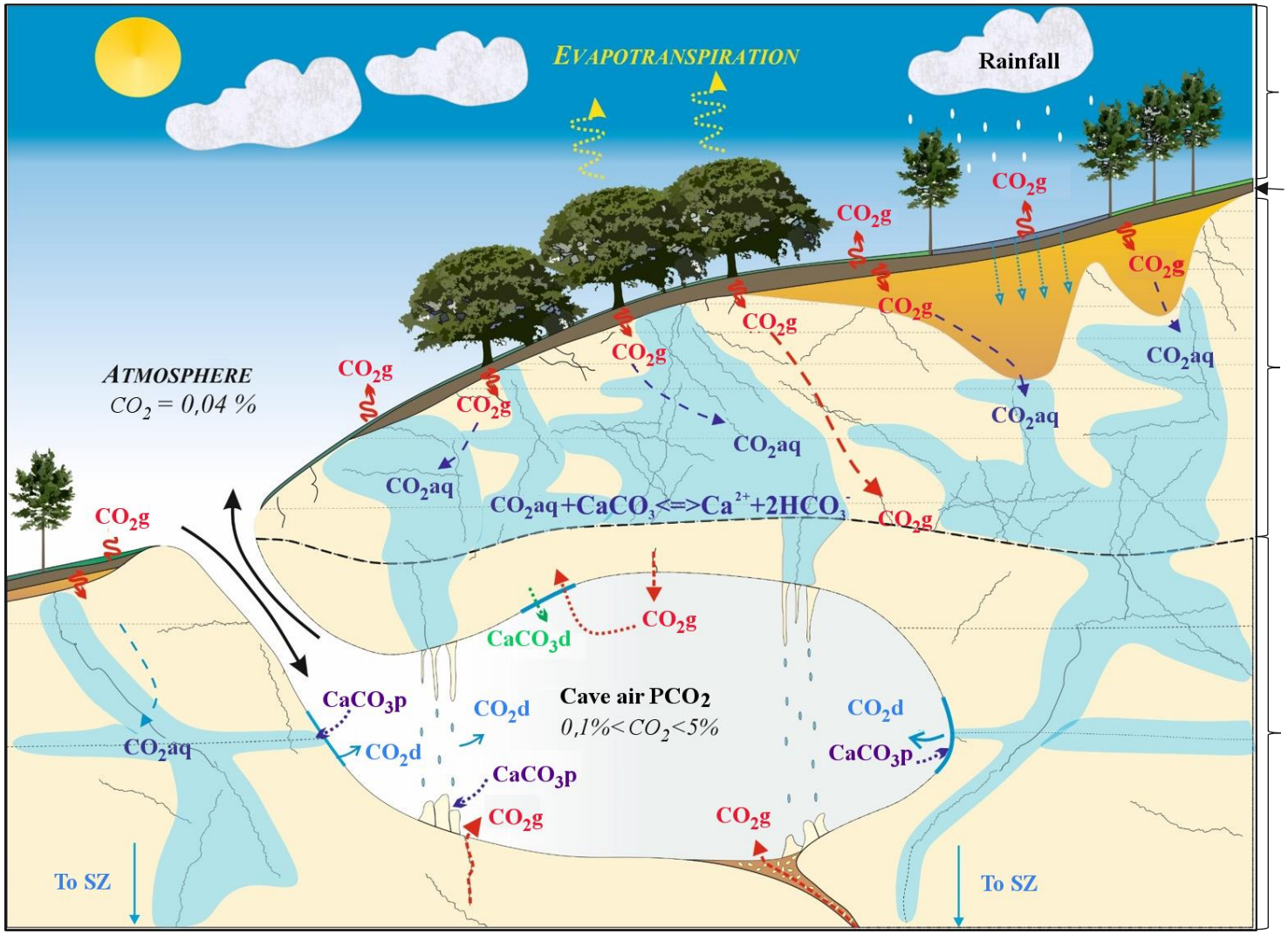
De 1963 à nos jours, priorité à la conservation :

- Commissions et comités scientifiques successifs :

  - Compréhension des relations entre la cavité et son environnement direct :

    - Hydrogéologues,
    - Géologues,
    - Géomorphologues,
    - Biologistes,
    - Géophysiciens,
    - Physiciens…

De 1963 à nos jours, priorité à la conservation :



Atmosphère

Sol

Epikarst

Zone de transmission

De 1963 à nos jours, priorité à la conservation :

- Commissions et comités scientifiques successifs :

  - Suivis hydroclimatiques :

    - Température (atmosphère, air et roche cavité, *etc.*),
    - Pression,
    - Pression partielle de CO_2 (pCO_2),
    - Débit de l'émergence…

De 1963 à nos jours, priorité à la conservation :

- Commissions et comités scientifiques successifs :

  - Suivis de l'état sanitaire des parois (interventions chronophages mais indispensables).

Relevé de l'état hydrique de paroi gauche de la Salle des Taureaux

Suivi photographique du blason de la Nef

SOMMAIRE

I. **Enjeux et problématiques de conservation**

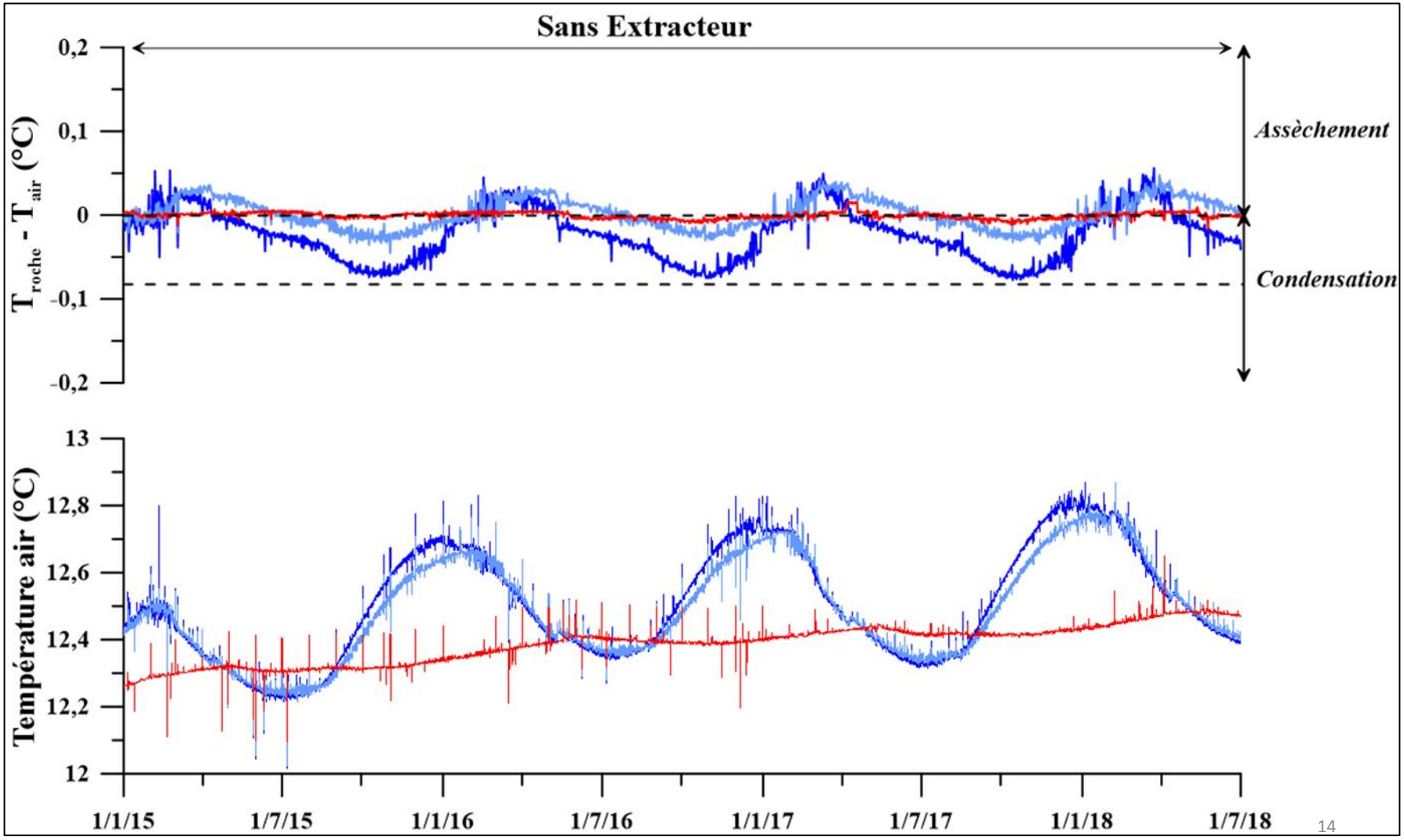
II. Le système de surveillance et la gestion quotidienne de la cavité

III. Gestion des risques d'altération des parois : PARIETAL

Un climat souterrain stable mais fragile :

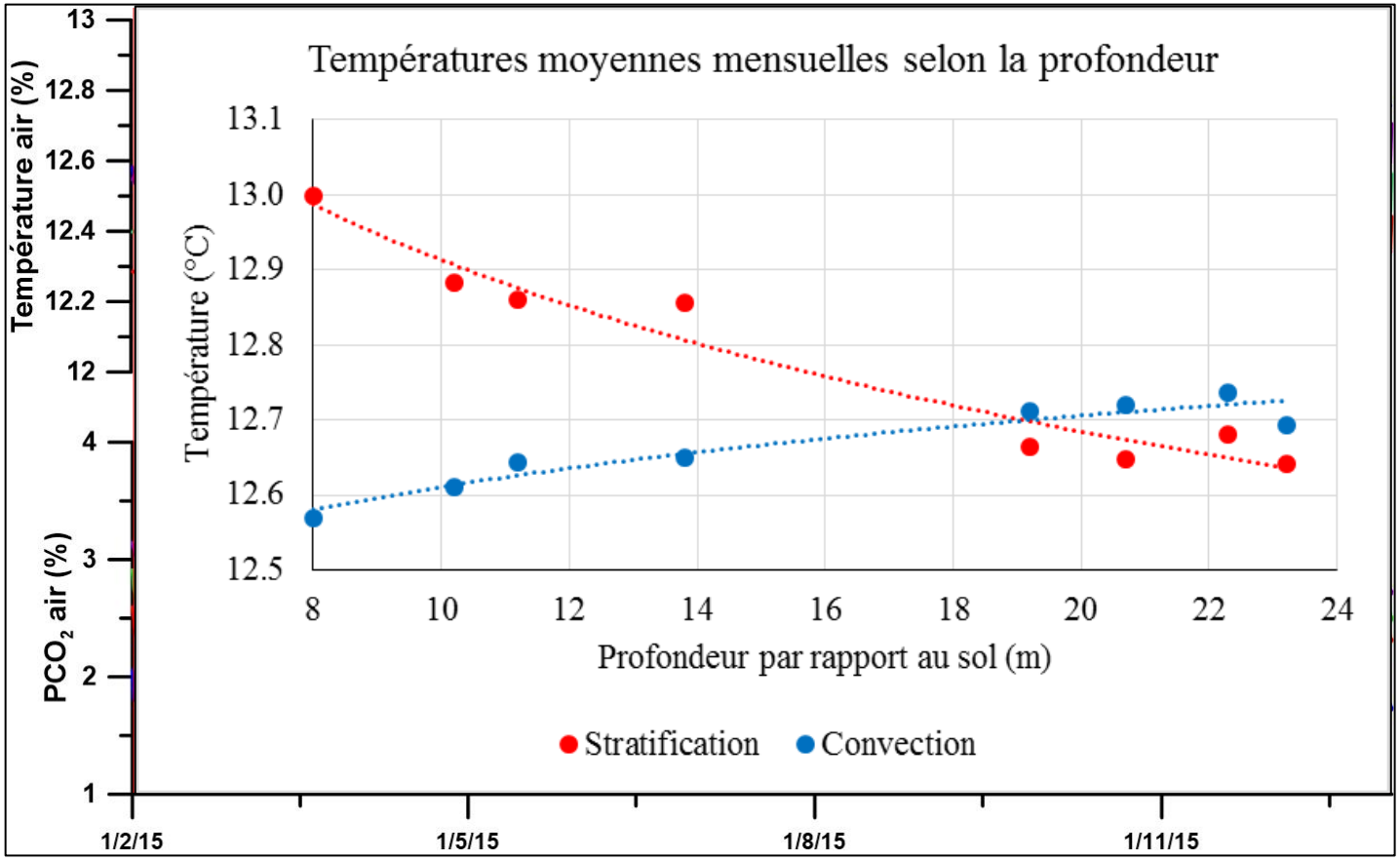
- Cavité est « **isolée** » de l'atmosphère extérieur,
- Cavité en **zone d'hétérothermie** : variations annuelles de l'ordre de 0.6°C dans les zones ornées,
- Des **équilibres thermiques air-roche tenus** : alternance de phases de condensation et d'assèchement des parois,

Un climat souterrain stable mais fragile :



Un fonctionnement aérologique saisonnier particulier :

- Alternance de phases de **stratification et de convection** selon l'évolution du gradient thermique.

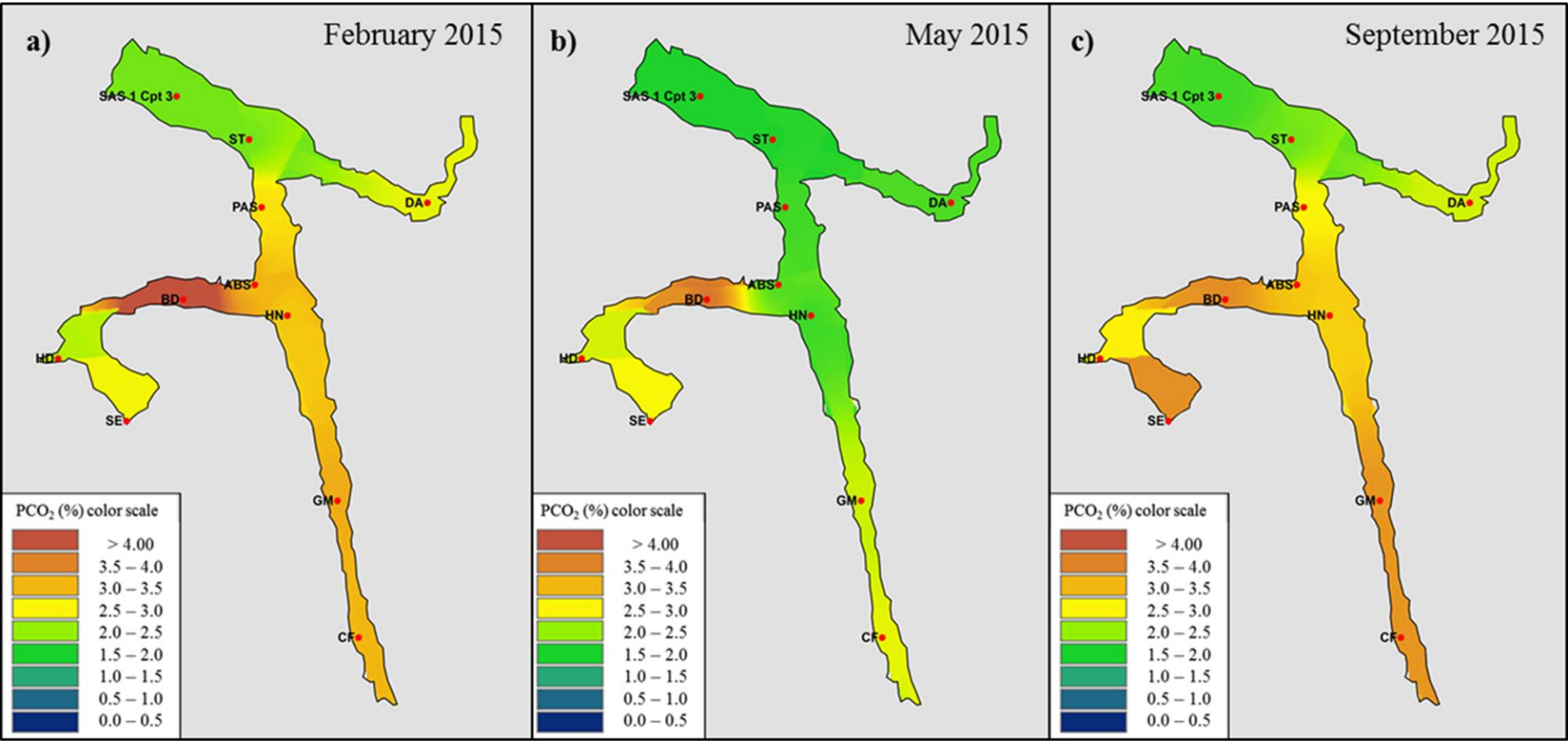


Houillon N., Lastennet R., Denis A., Malaurent P., (2017c). Comprendre les flux hydro-climatiques pour la gestion des « équilibres » de la Grotte de Lascaux. Lascaux La Belle, Sept années de recherches et de veille, UNESCO Paris, France, 17-18 Octobre.

Une chimie de l'air propice aux mécanismes d'altération des parois :

- Humidité relative proche de 100% (condensation possible),
- Pression partielle de CO_2 importantes : 1.2% à 6.5% (atmosphère extérieur = 0.04%).

Une chimie de l'air propice aux mécanismes d'altération des parois :



Houillon N., Lastennet R., Denis A., Malaurent P., Minvielle S., Peyraube N. (2017). Assessing cave internal aerology in understanding carbon dioxide (CO_2) dynamics: implications on calcite mass variation on the wall of Lascaux cave (France), Environmental Earth Sciences.

L'altération physico-chimique des parois ornées :

- Recouvrement et desquamation des parois : CO_2 et infiltration.

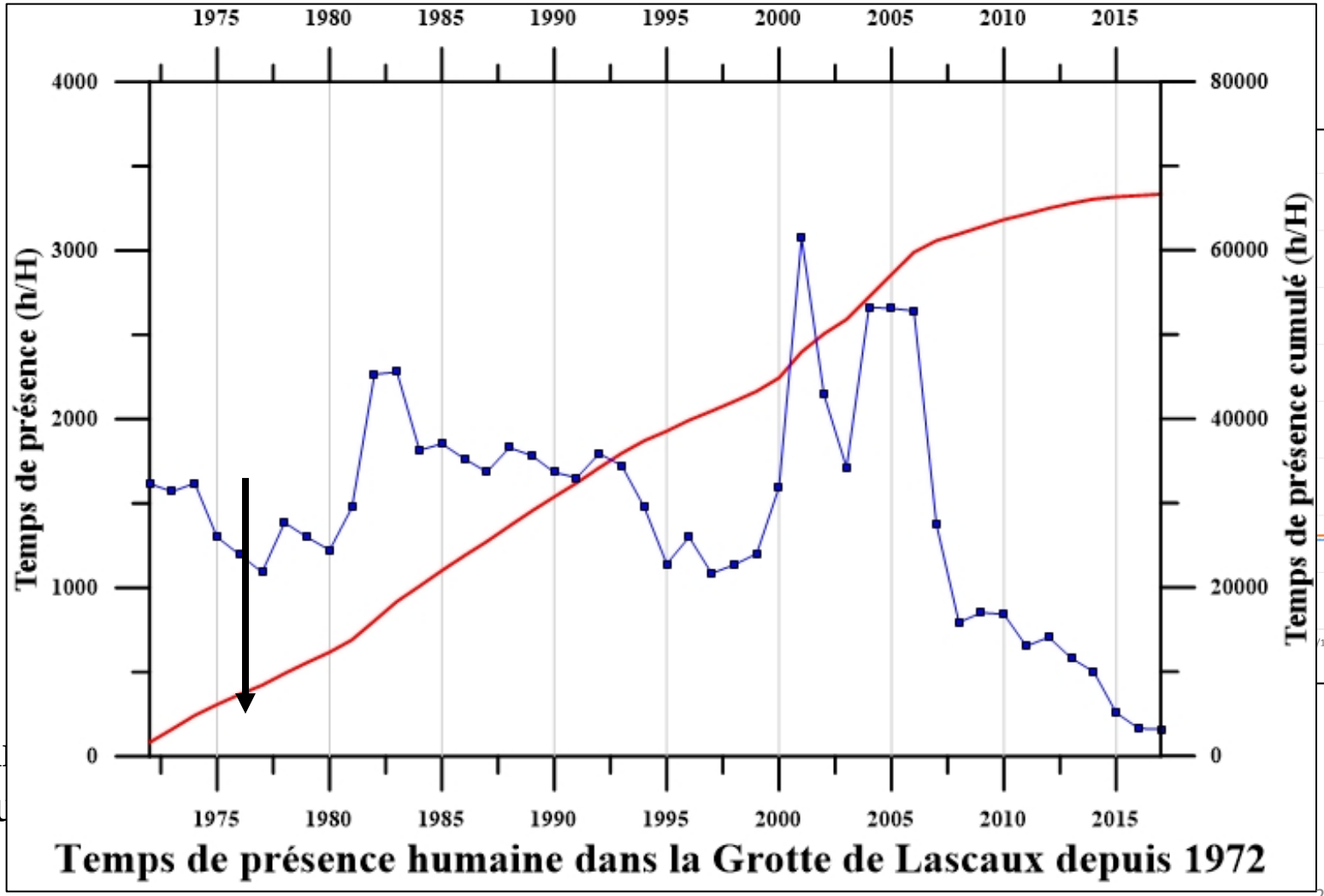
Ecaille desquamée dans la Salle des Taureaux

L'altération physico-chimique des parois ornées :

- Dissolution du support ornée : CO_2 et condensation.

Vue du 3D montrant la dissolution passée des parois du Passage.

Problématique des interventions humaines :

- 

Comm
tou

SOMMAIRE

I. Enjeux et problématiques de conservation

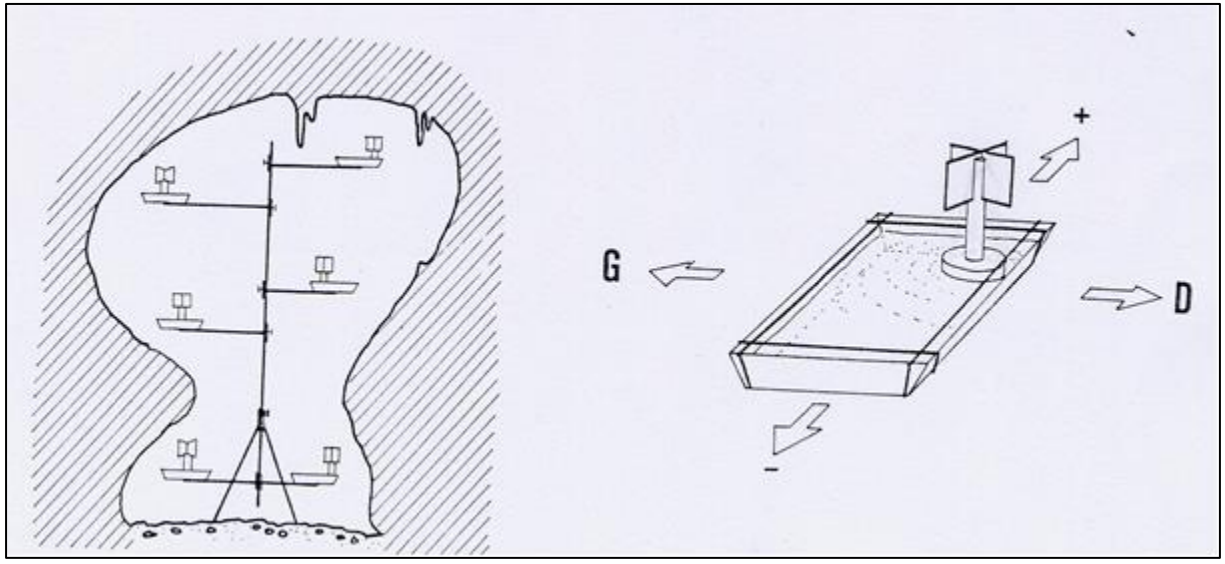
II. Le système de surveillance et la gestion quotidienne de la cavité

III. Gestion des risques d'altération des parois : PARIETAL

Des mesures hydroclimatiques depuis les 50's :

- Quelques ratés comme la mesure de l'humidité par psychrométrie (perturbations du milieu),

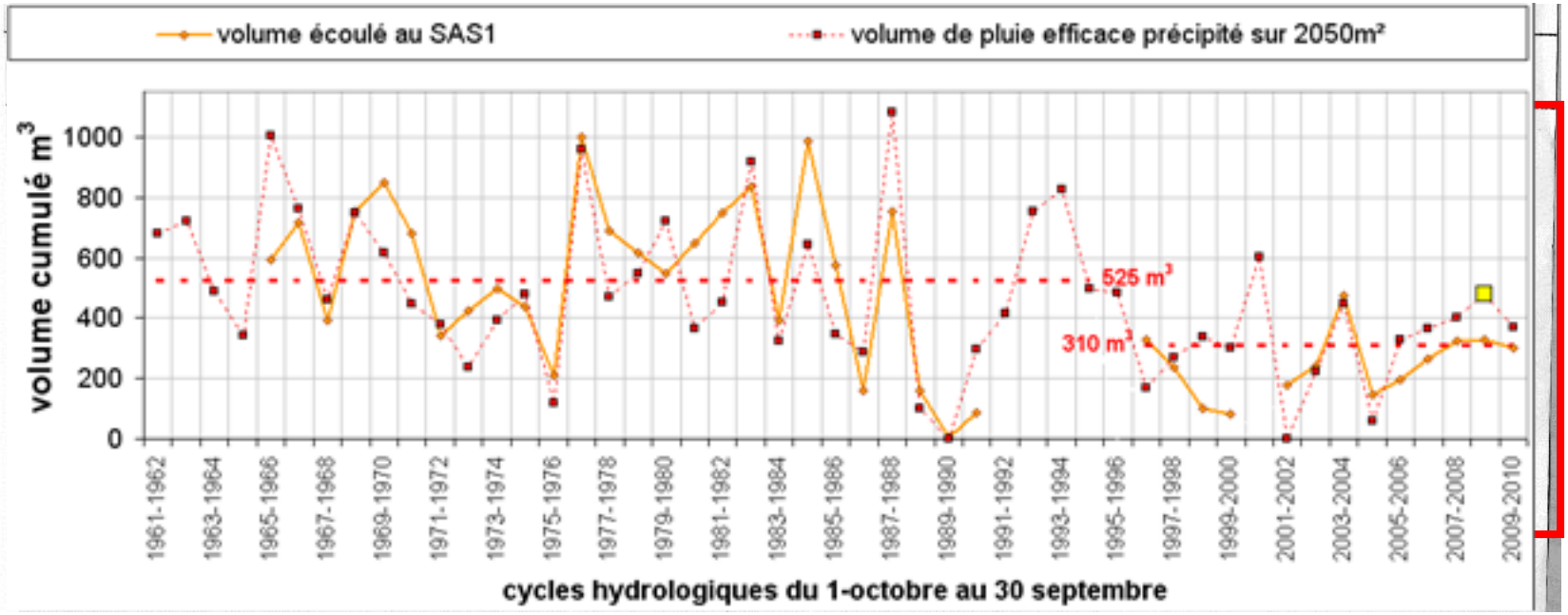
- Des mesures avec des moyens limités (mouvements d'air).



Dispositif d'observation des mouvements d'air (Vidal et Brunet)

Des mesures hydroclimatiques depuis les 50's :

- Des mesures difficilement exploitables : pCO_2 mesurée à la bougie ou changement de technique de mesure du Q.



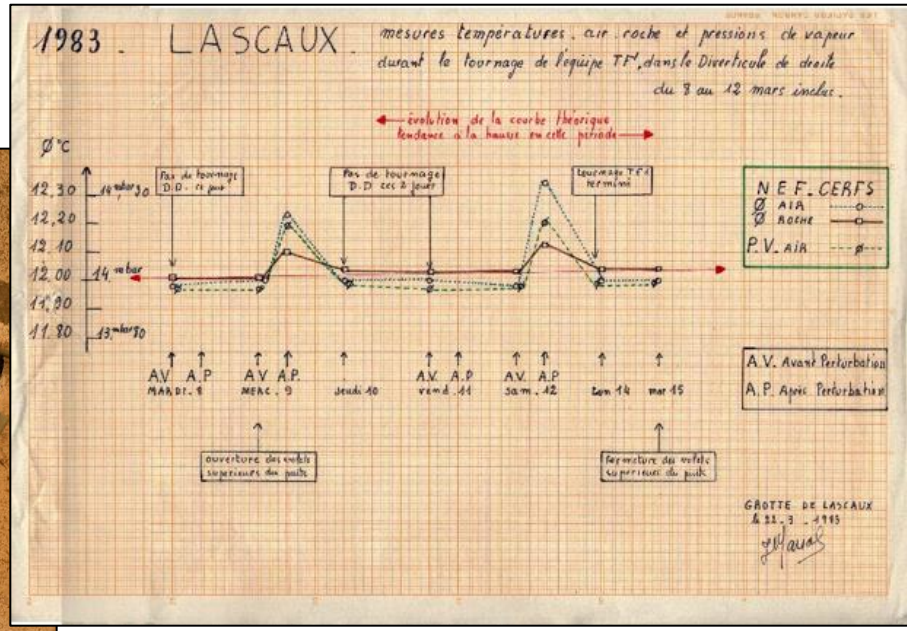
Exemples de mesures de CO_2 réalisées en 1965

Evolution des volumes écoulés à l'émergence du SAS de 1961 à 2010 (Peyraube et al., 2012).

Des mesures hydroclimatiques depuis les 50's :

- Mais un historique du climat souterrain riche en informations.

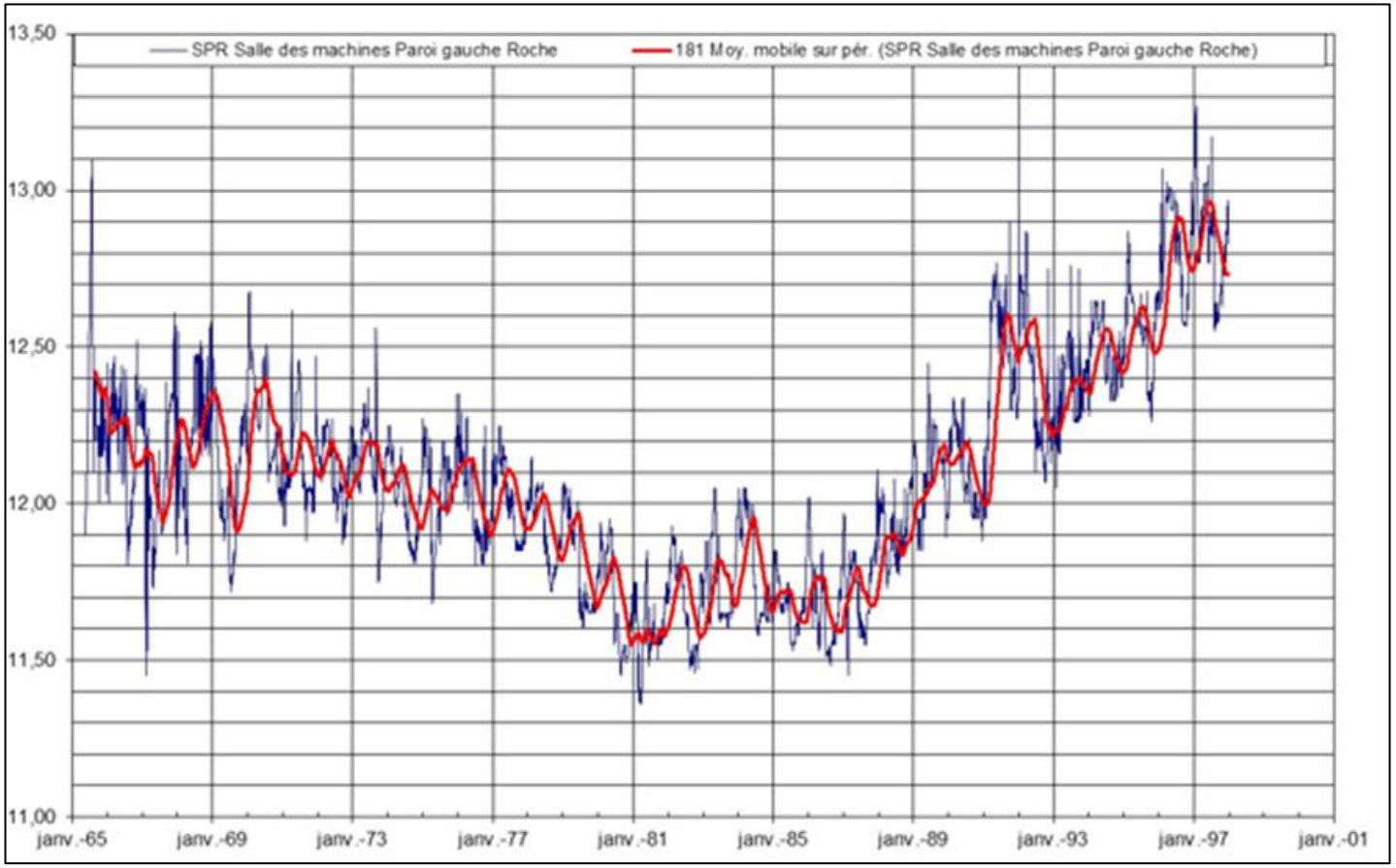
Quelques sondes de T utilisées à Lascaux



Exemple de mesures de T datant de 1983 (impact d'une entrée humaine)

Des mesures hydroclimatiques depuis les 50's :

- Mais un historique du climat riche en informations.



Evolution des températures de la paroi de la Salle des Machines de 1965 à 2001

Des mesures hydroclimatiques depuis les 50's :

- Modernisation du dispositif (analyse plus fine) :

De 1964 à 1996
pas : jour

manuelle

07/06/1996	12,54
08/06/1996	
09/06/1996	
10/06/1996	12,50
11/06/1996	12,50
12/06/1996	12,50
13/06/1996	12,48
14/06/1996	12,48
15/06/1996	
16/06/1996	

1 mesure par jour

De 1996 à 2011
pas : **10 minutes**

automatique
centralisé

24/05/1996 10:00	12,59
24/05/1996 10:10	12,64
24/05/1996 10:20	12,6
24/05/1996 10:30	12,58
24/05/1996 10:40	12,57
24/05/1996 10:50	12,56
24/05/1996 11:00	12,56
24/05/1996 11:10	12,55
24/05/1996 11:20	12,55
24/05/1996 11:30	12,55

144 mesures

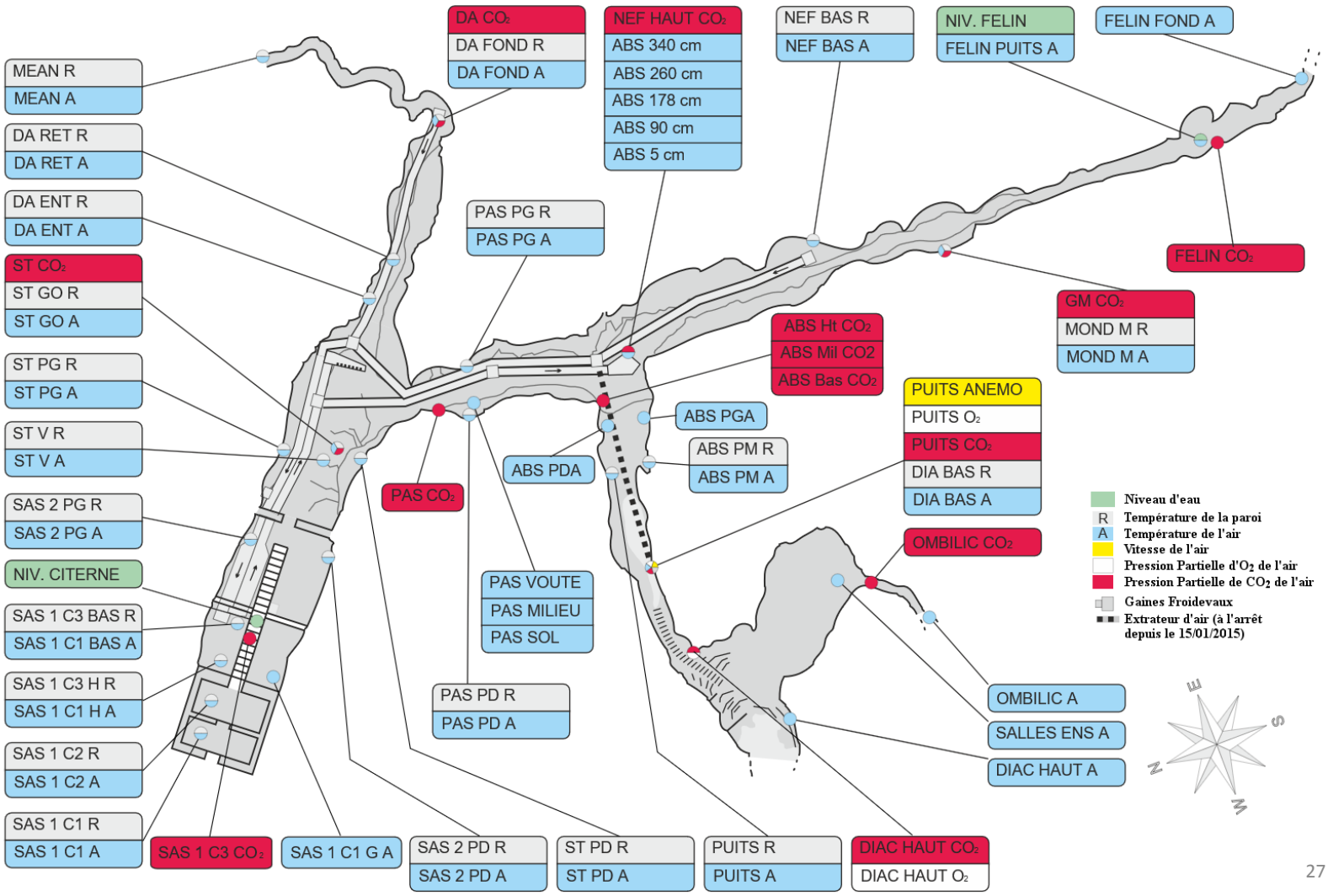
A partir de 2011
pas : **1 minute**

automatique
centralisé
supervision en direct

24/5/17 0:06	12,586
24/5/17 0:07	12,585
24/5/17 0:08	12,586
24/5/17 0:09	12,585
24/5/17 0:10	12,585
24/5/17 0:11	12,584
24/5/17 0:12	12,584
24/5/17 0:13	12,583
24/5/17 0:14	12,582
24/5/17 0:15	12,583

1440 mesures

Stratégie du monitoring :



Différents capteurs et caractéristiques :

- Températures : 55 sondes PT100 (0.01°C / 0.001°C),

- pCO2 : 15 sondes Vaisala® GMP 221 NDIR (0.005% / 0.001%),

- Pression : 3 sondes Vaisala® (± 0.1hPa).

Centrales d'acquisition Ahlborn® (9) en réseau

Différents capteurs et caractéristiques :

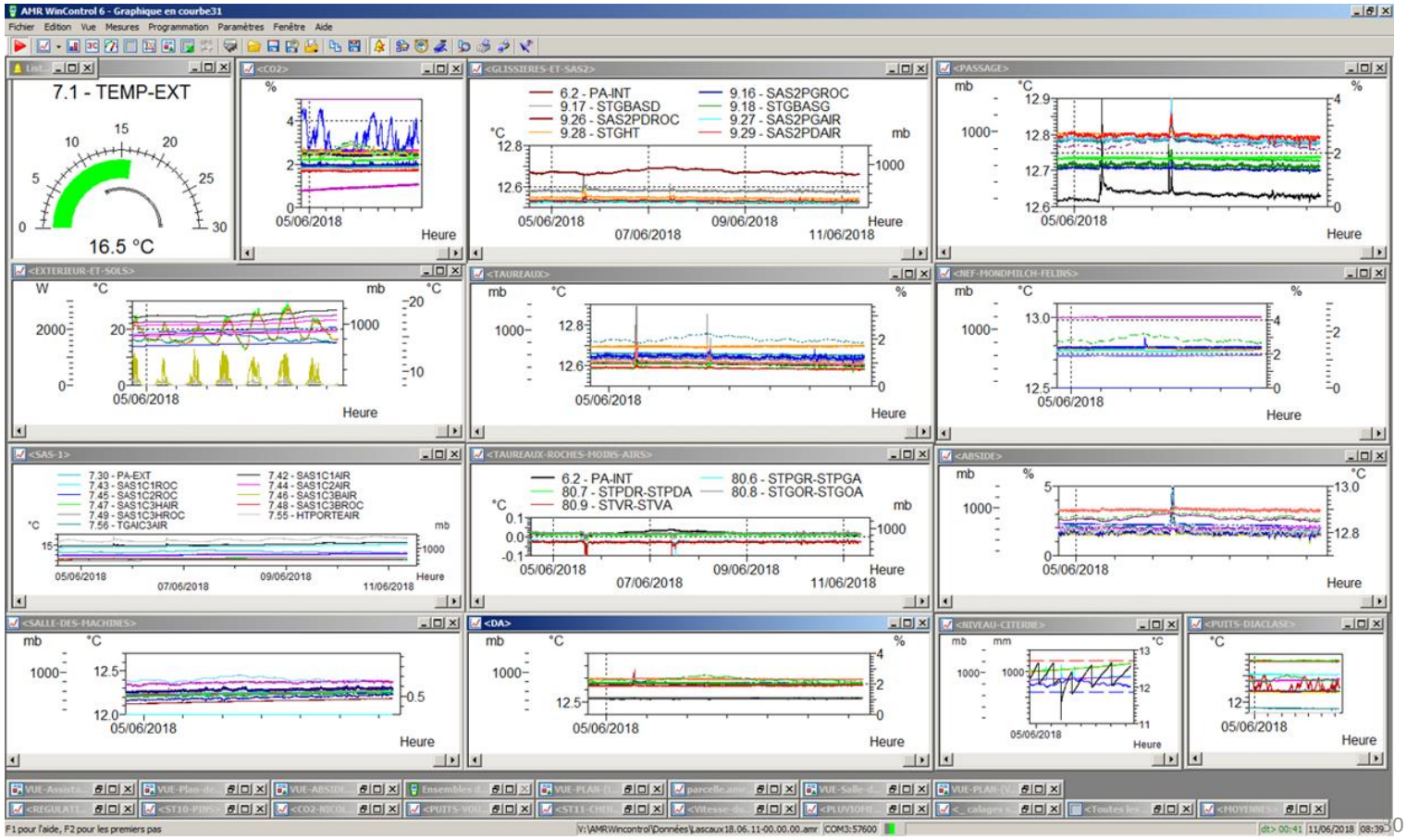
- Températures : sondes PT100 (0.01°C – 0.001°C),

⬇

Calibration inter-sondes (2 sondes de références)

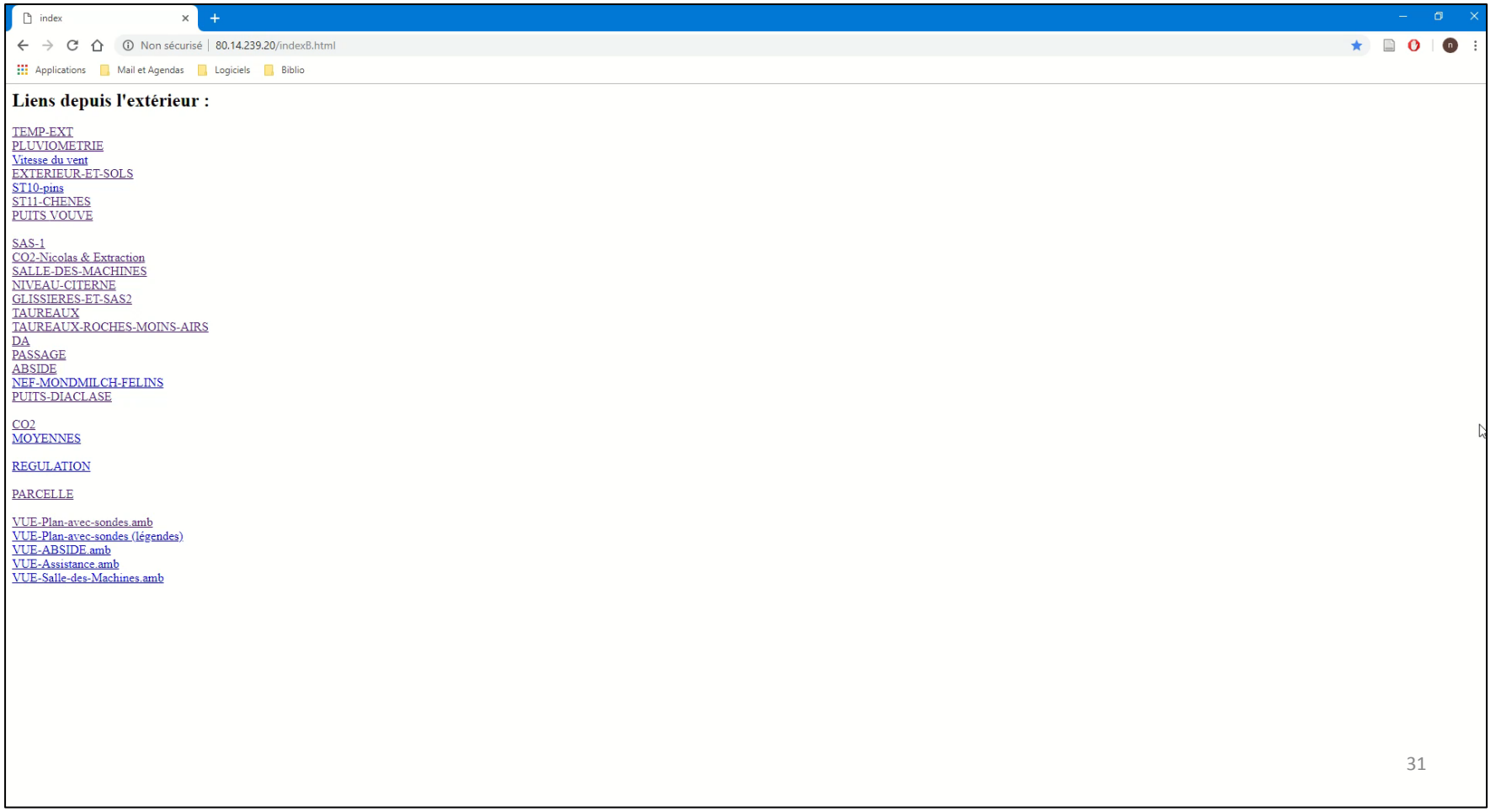
Visualisation en direct de l'évolution des paramètres :

- Logiciel AMR WinControl (Akrobit®).



Accès à distance sécurisé (adresse IP fixe) :

- Logiciel AMR WinControl (Akrobit®).



Critères de décision pour l'autorisation d'une intervention :

- Régime aérologique : stratification **-** / **+** convection,
- $\Delta T_{roche\text{-}air}$: condensation (<0) **-** / + assèchement (>0),
- pCO_2 : santé des intervenants (durée d'exposition),
- T extérieure : < 5°C (éviter entrée air froid).

↓

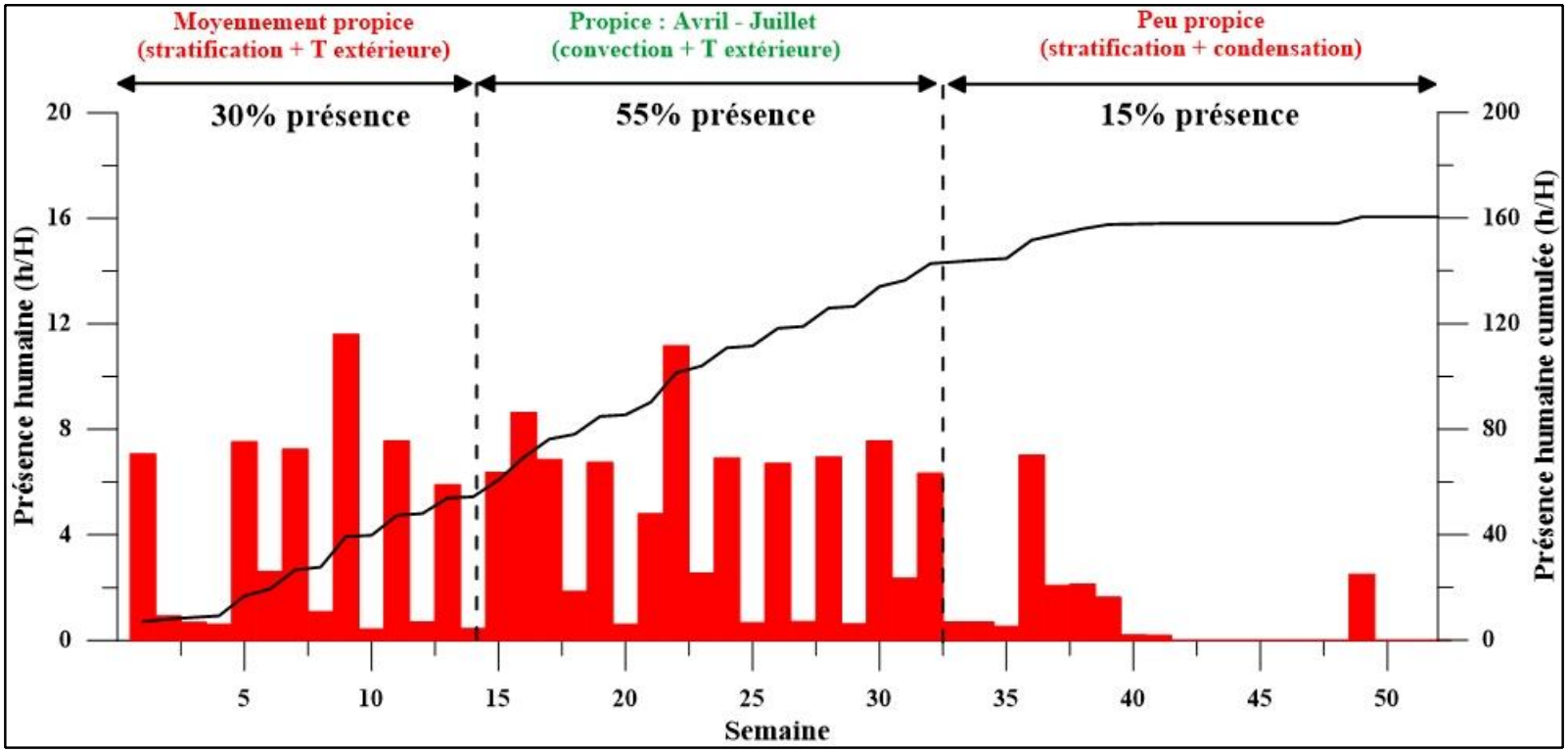
Prédictions météos

+

Superviseur

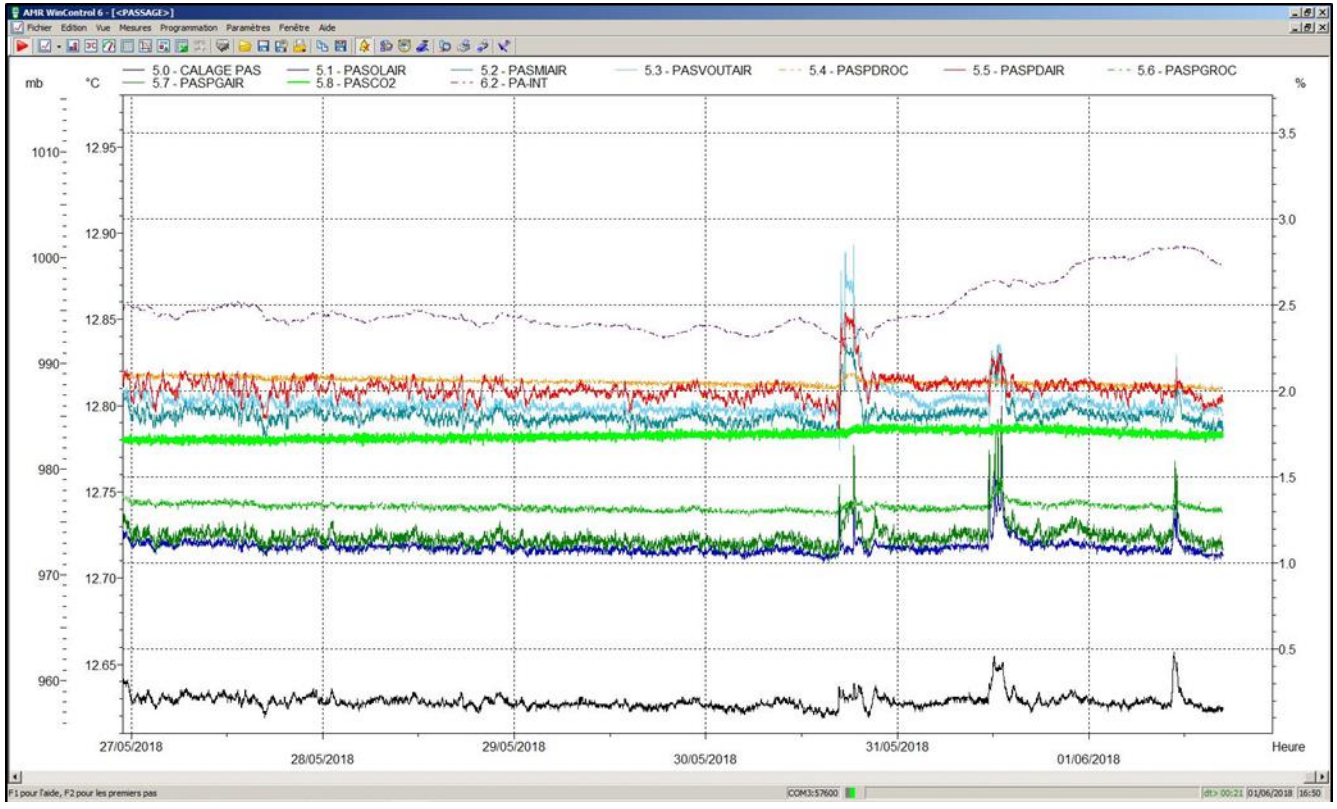
Les interventions humaines dans la partie ornée en 2017 :

- 160 h/H dans la partie ornée réparties sur l'année selon conditions microclimatiques (superviseur).



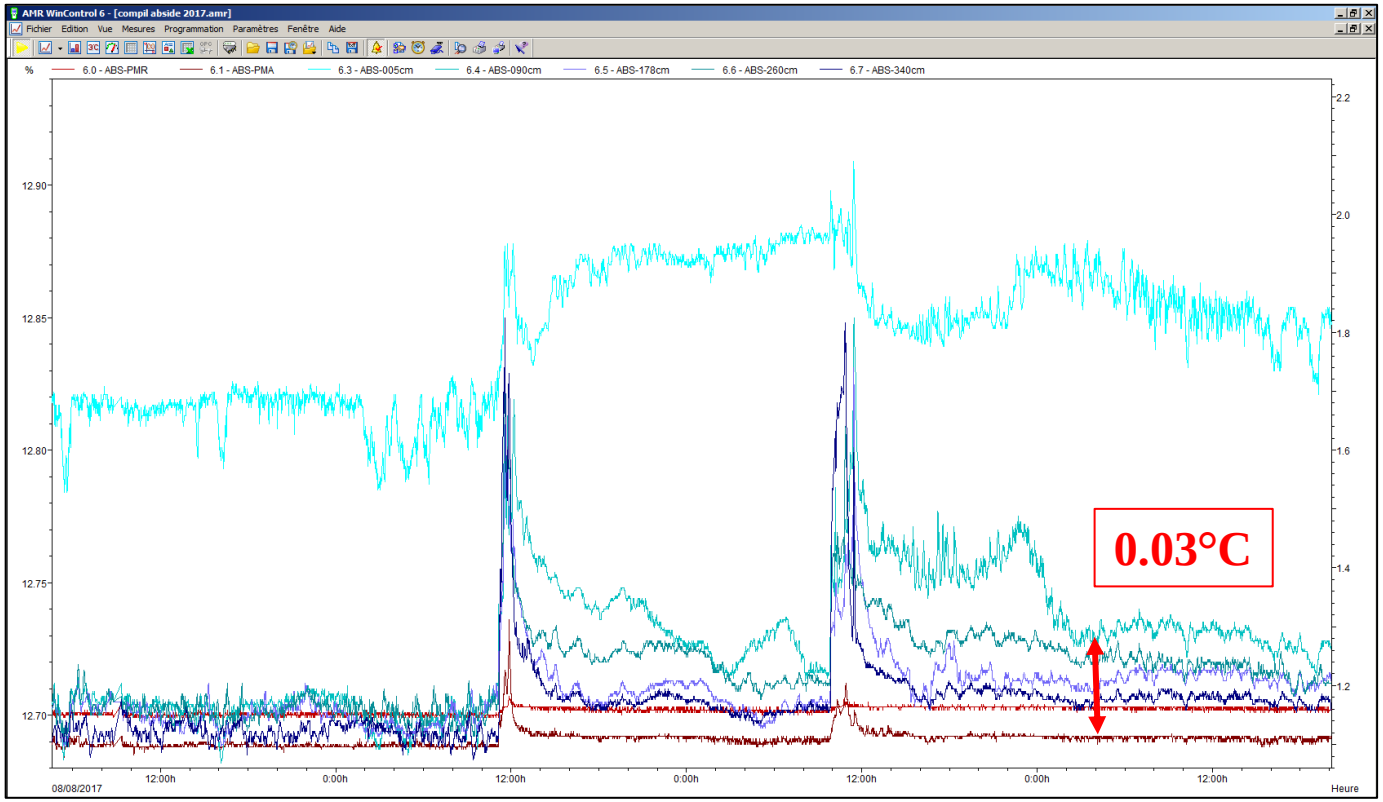
Suivi en direct de l'impact des interventions et REX

- Exemple du suivi d'une intervention (Mai 2018) :
  - Régime convectif : forte dissipation calorifique,
  - Réchauffement de l'air négligeable (<0.01°C).



Suivi en direct de l'impact des interventions et REX

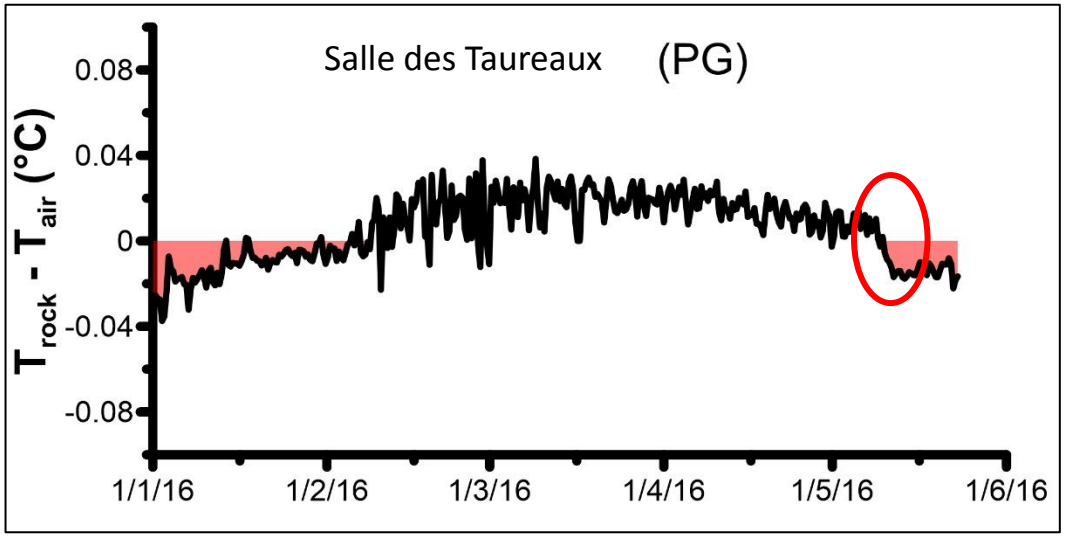
- Exemple du suivi d'une intervention (Août 2017) :
  - Régime stratifiée : faible dissipation calorifique,
  - Réchauffement de l'air non négligeable (0.03°C).



Peu d'intervention pendant les semaines suivantes

Suivi en direct de l'impact des interventions et REX

- Exemple du suivi d'une intervention (Mai 2016) :
  - Impact important sur la différence de température à la paroi (-0.02 °C en deux jours),
  - Déséquilibre en période de transition aérologique.



Limiter interventions en période de transition aérologique

SOMMAIRE

I. Enjeux et problématiques de conservation

II. Le système de surveillance et la gestion quotidienne de la cavité

III. Gestion des risques d'altération des parois : PARIETAL

Objectifs de PARIETAL

- Fournir une base de décision objective aux gestionnaires :

  - Planification à long terme des interventions chronophages,
  - Vérification des conditions avant chaque entrée,
  - Analyse des origines des perturbations observées.

↓

Données et connaissances acquises depuis plusieurs années (bdd),

Données acquises en temps réel (système de surveillance),

Différents relevés (état hydrique, condensation).

Solution technique et architecture de PARIETAL

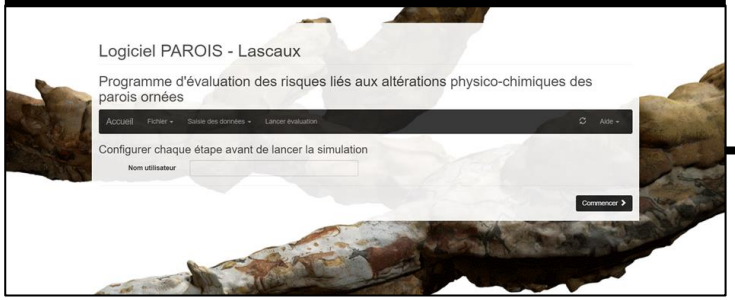
- Raspberry Pi hébergeant serveur web sécurisé et bdd,
- Application sous la forme d'une « Web logiciel ».

Raspberry hébergeant PARIETAL (Fabrication additive I2M)

Solution technique et architecture de PARIETAL

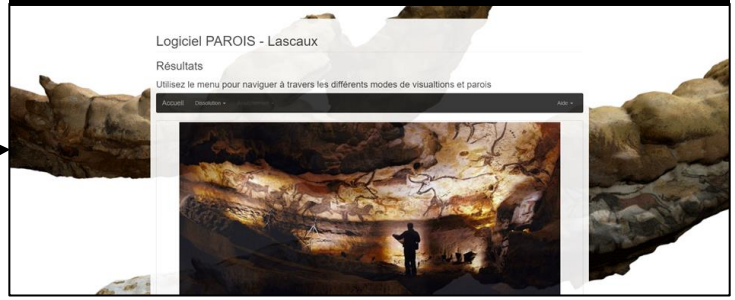
Base de données (µclimato, impacts humains, vulnérabilités, *etc.*)

Page d'accueil (configuration, données)



Simulations

Page de résultats (affichages et analyses)



Réseau de surveillance

Deux risques évalués : déterministe et probabiliste (20 000 simulations MC)

- **Dissolution R_D** (12 parois instrumentées : ΔT air/roche),
- **Précipitation R_P** (4 parois affectées par les exfiltrations).

Evaluation du risque	Note
Très faible	0-1
Faible	1-2
Moyen	2-3
Elevé	3-4
Très élevé	4-5

Dissolution

- Condensation = $f(\Delta T_N ; \Delta T_H)$ → $I_{con} = [\Delta T_N + (\Delta T_H * t_H)] * 50$
- Corrosion = $f(PCO_2)$ → $I_{cor} = (0{,}2 * PCO_2^{0,36})/0.07$

→ $R_D = V\,(a\, I_{con} + b\, I_{cor})$

Avis d'experts :

V la vulnérabilité à R_D
a et b coeff de pondération

PARIETAL - Accueil
Non sécurisé | 82.64.55.44:8081/raspcaux/index.php
Applications
Mail et Agendas
Logiciels
Biblio
PARIETAL
V1.0
Programme d'évaluation des risques liés aux altérations physico-chimiques des parois ornées
Accueil
Fichier
Saisie des données
Aide
Configurer chaque étape avant de lancer la simulation
Nom utilisateur
Commencer
I2M
université de BORDEAUX
cnrs
INSTITUT CARNOT ARTS
ARTS ET MÉTIERS ParisTech
Bordeaux INP
INRA
Culture
PARIETAL©

CONCLUSION

Système de surveillance microclimatique performant :

- Pas de dérive observée malgré environnement difficile (100% humidité),
- Modernisation au fil des années permet aujourd'hui de suivre avec précision l'impact des interventions humaines,
- REX et amélioration de la gestion de la cavité notamment grâce à l'utilisation d'outil d'aide à la décision (PARIETAL).

Quelques verrous technologiques :

- Mesure précise de T à l'interface air/paroi,
- Mesure de l'humidité relative de l'air ambiant,
- Suivi de l'état hydrique des parois.

Merci pour votre attention

nicolas.houillon@u-bordeaux.fr

DÉVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF DE SPECTROSCOPIE VIBRATIONNELLE POUR LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF D'EXPLANTS DE PEAU

Alice Lemarquand [1], *Fabio Stefani* [1], *Philippe Leproux* [2], *Nicolas Wilkie-Chancellier* [1], *Jean-Yves Le Huérou* [1], *Stéphane Serfaty* [1]

[1] *Laboratoire SATIE,* [2] *Laboratoire XLIM*

8ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation

29 janvier 2019

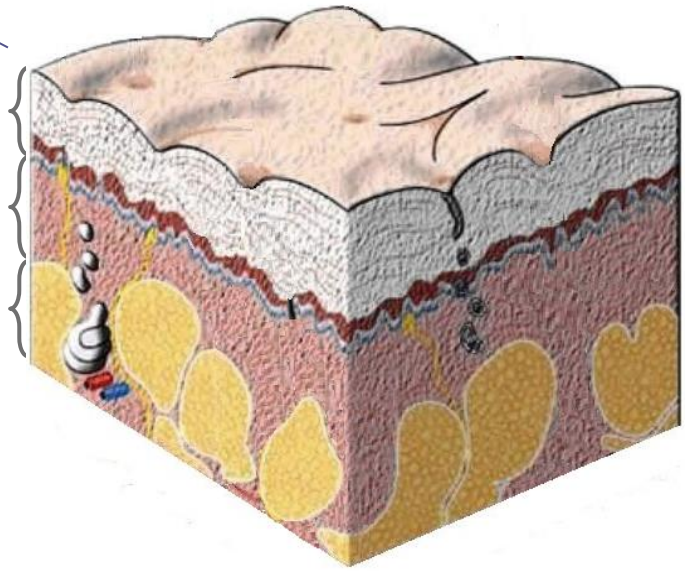
Caractérisation cutanée

Couche cornée

Epiderme (50 µm – 1.5 mm)

Derme (1-4 mm)

Hypoderme



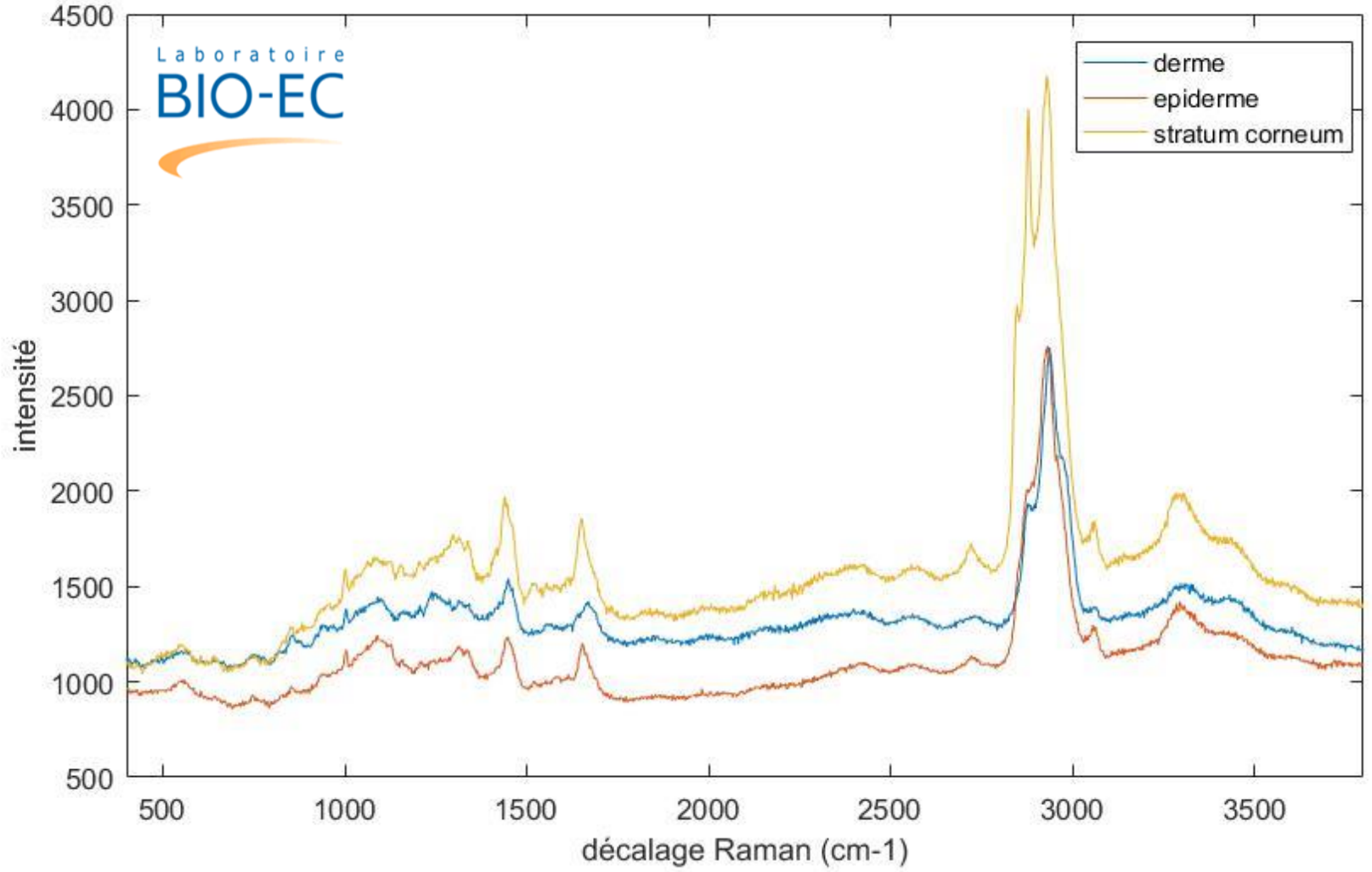
Dermatologie

Cosmétique

Laboratoire BIO-EC

Explant de peau

Spectroscopie Raman pour l'étude de la peau



Spectroscopie Raman pour l'étude de la peau

- Identification des liaisons
- Conformation des lipides
- Structure des protéines

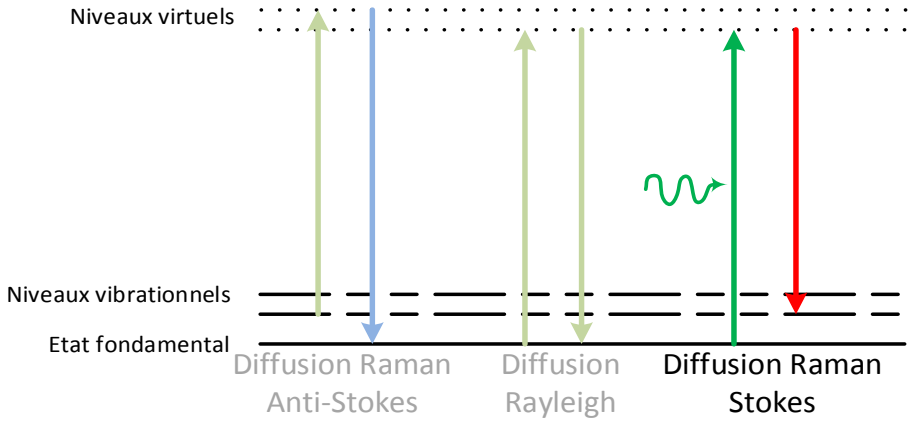
- Profil de concentration
- Imagerie

- Physiologie de la peau
- Interaction produits-peau
- Diagnostic

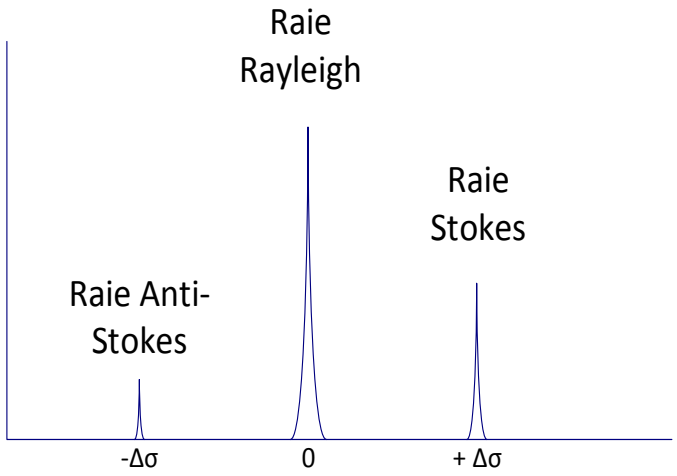
- Non invasif
- Non destructif
- Insensible à l'eau

- Faible rendement photonique

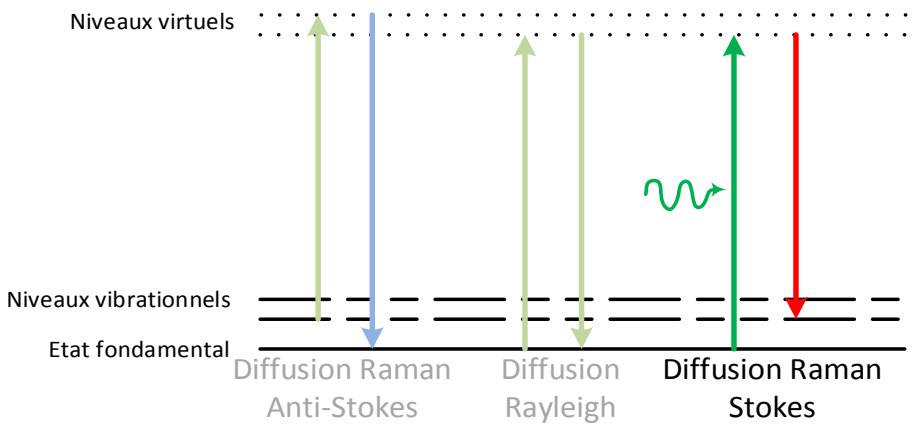
Spectroscopie vibrationnelle par effet Raman



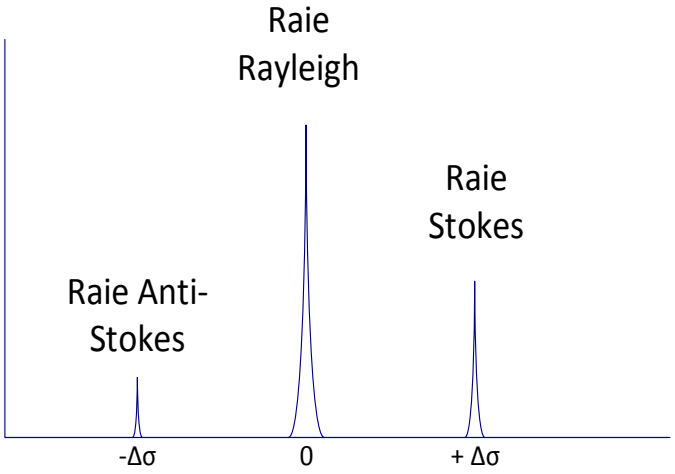
Raman spontané

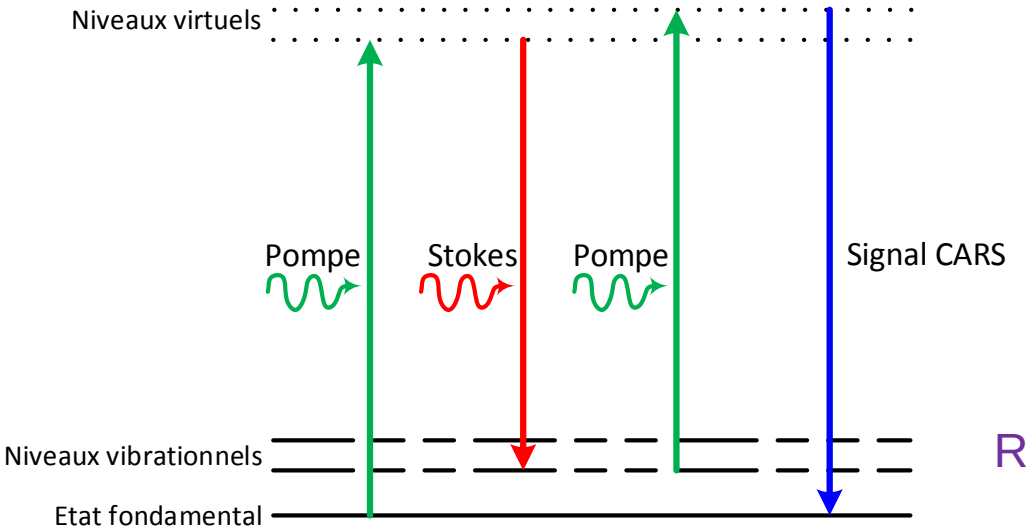


Spectroscopie vibrationnelle par effet Raman



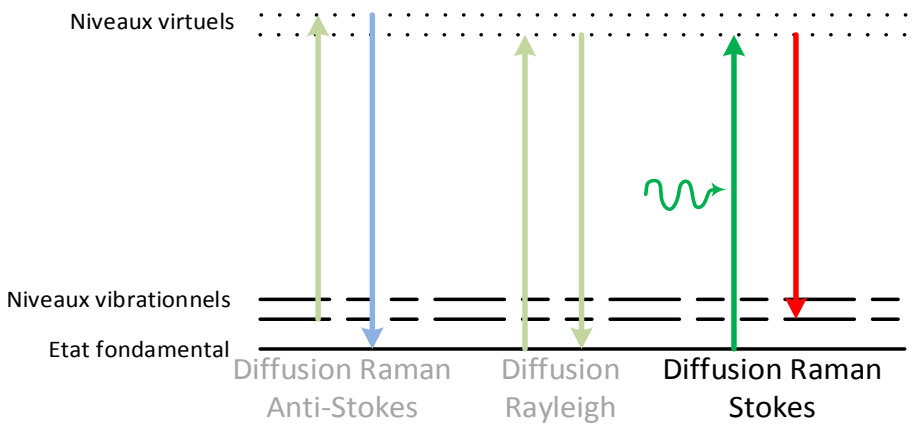
Raman spontané

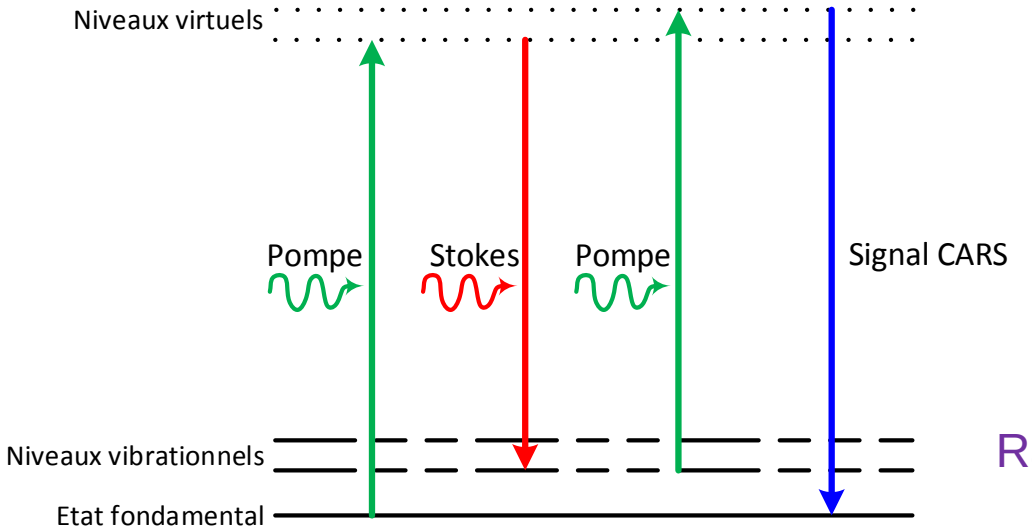




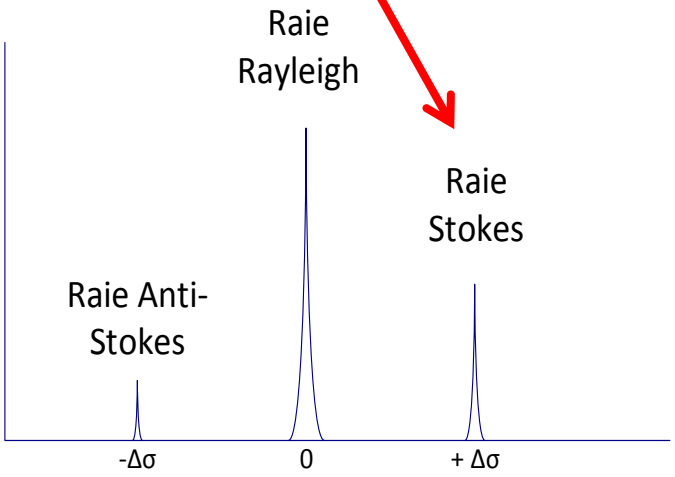
Raman cohérent Anti-Stokes (CARS)

Spectroscopie vibrationnelle par effet Raman



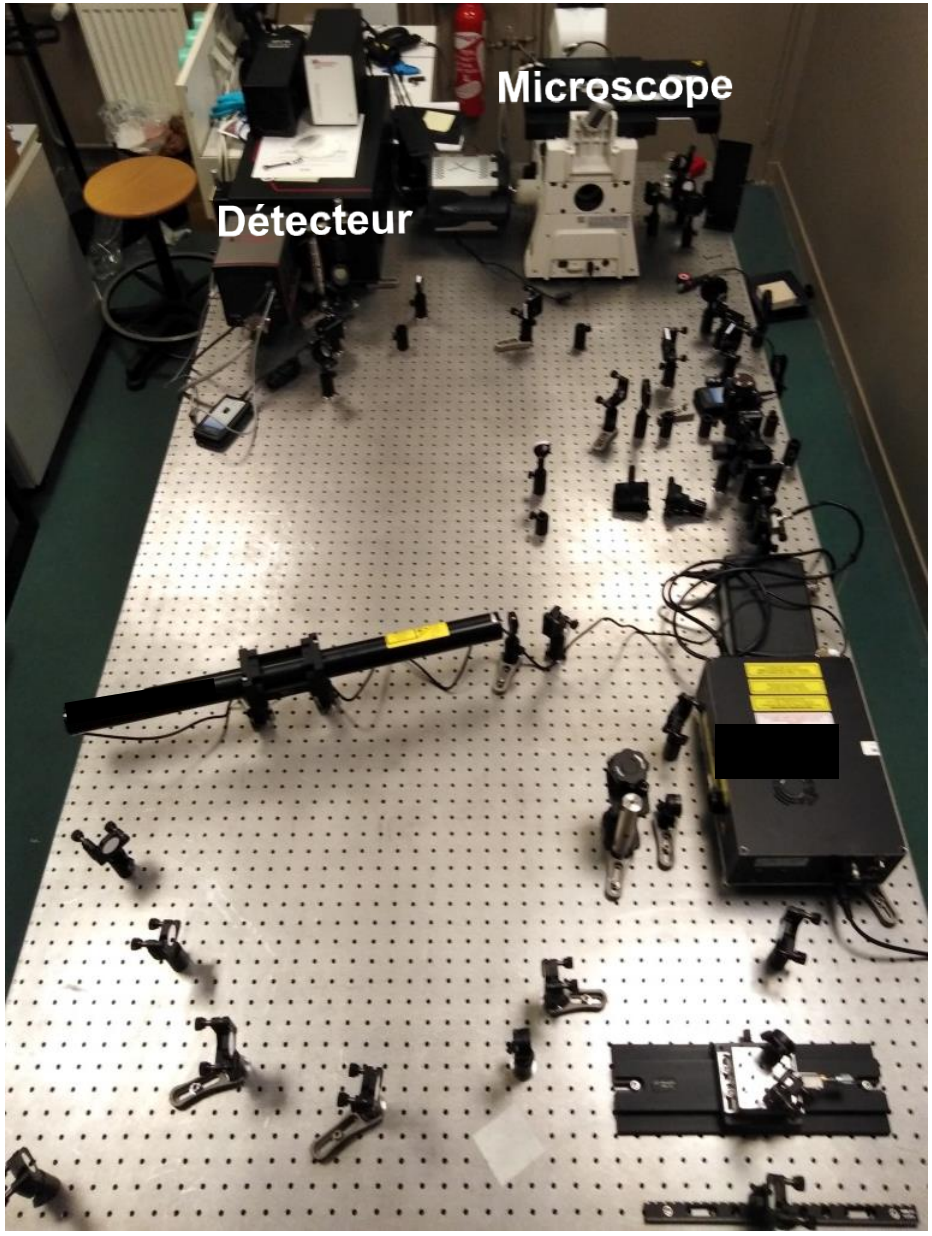


Raman spontané

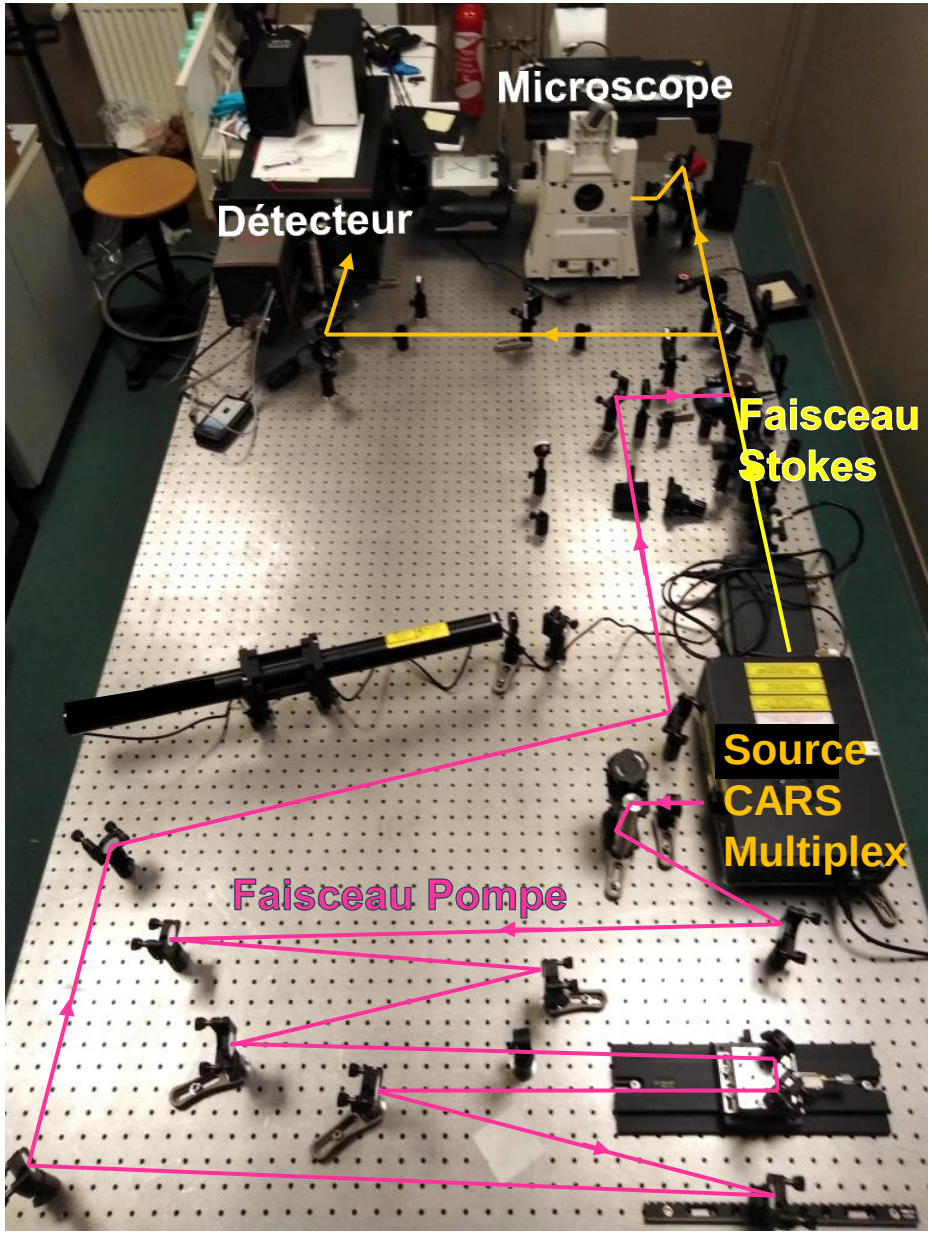


Raman cohérent Anti-Stokes (CARS)

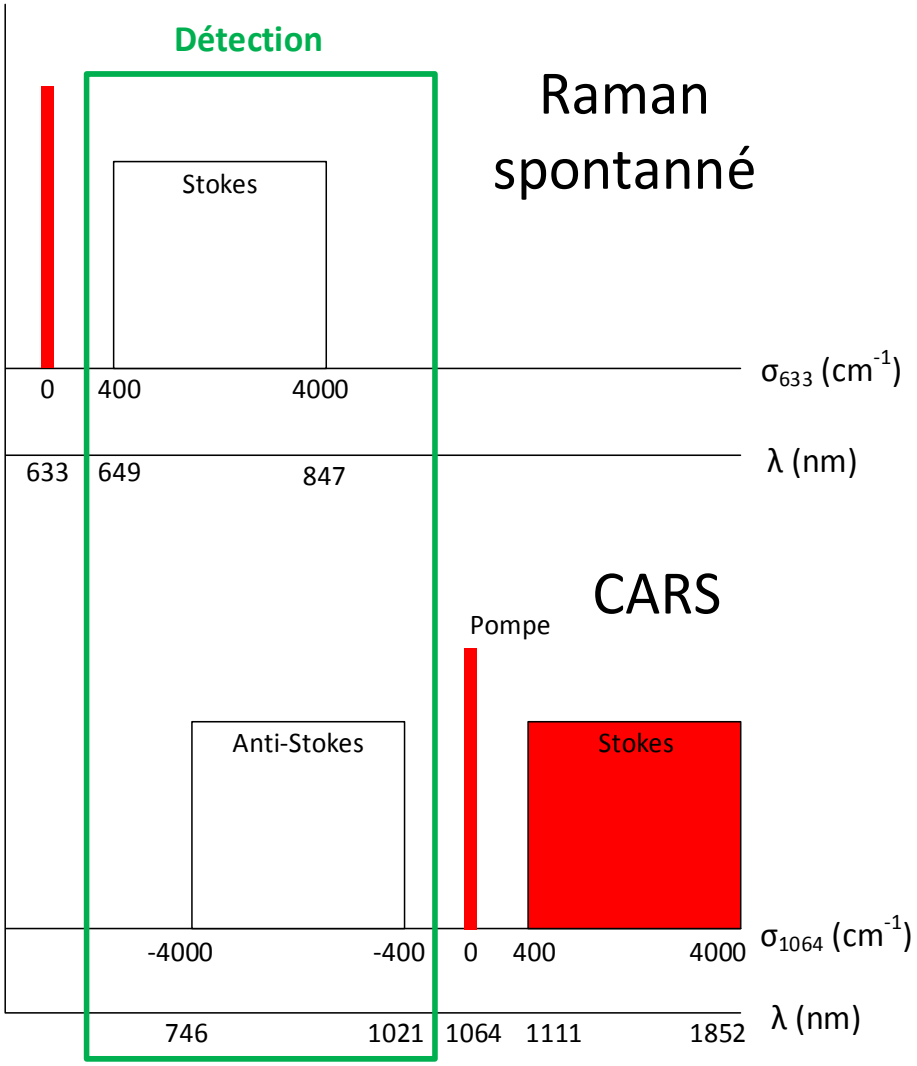
Banc optique

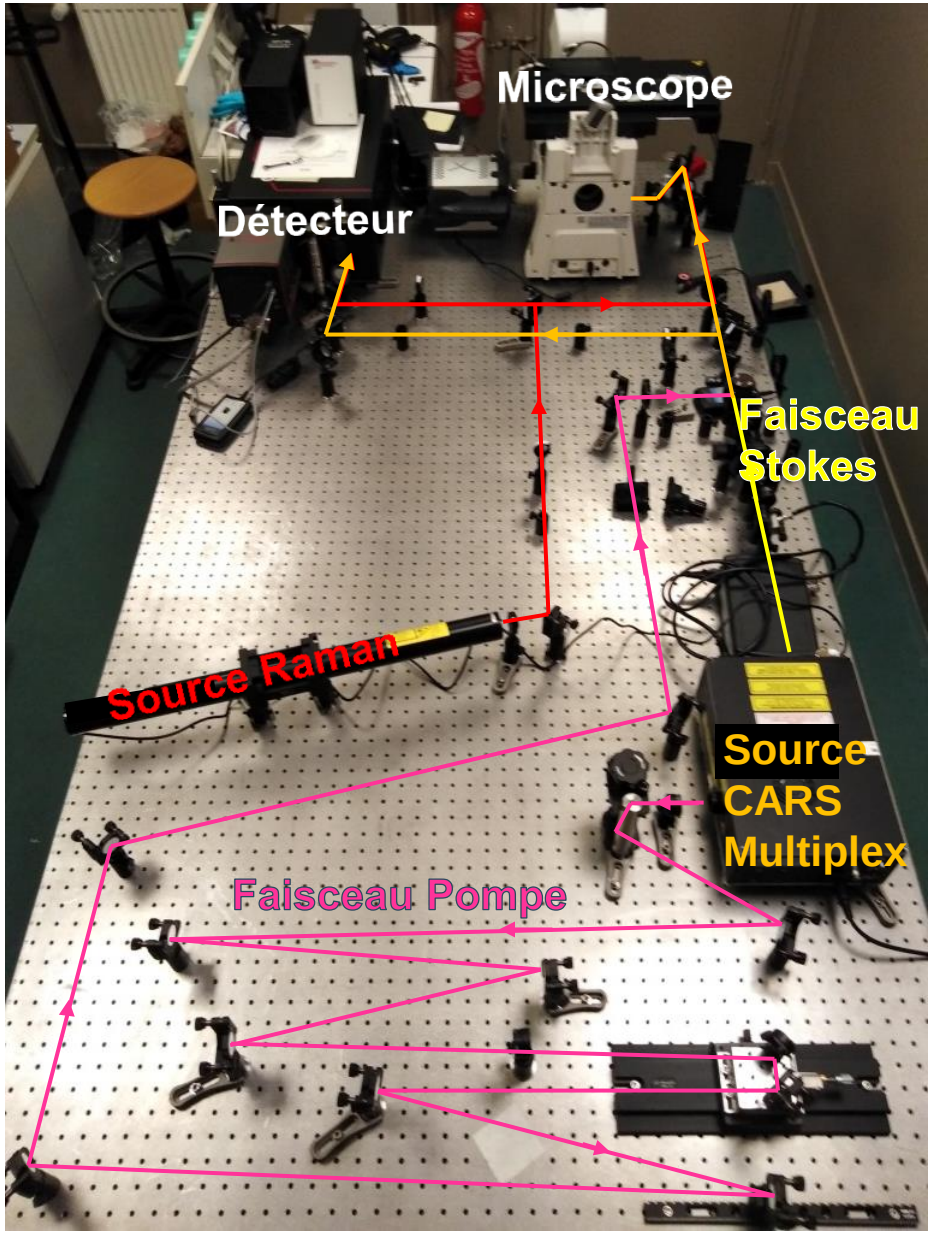


Banc optique

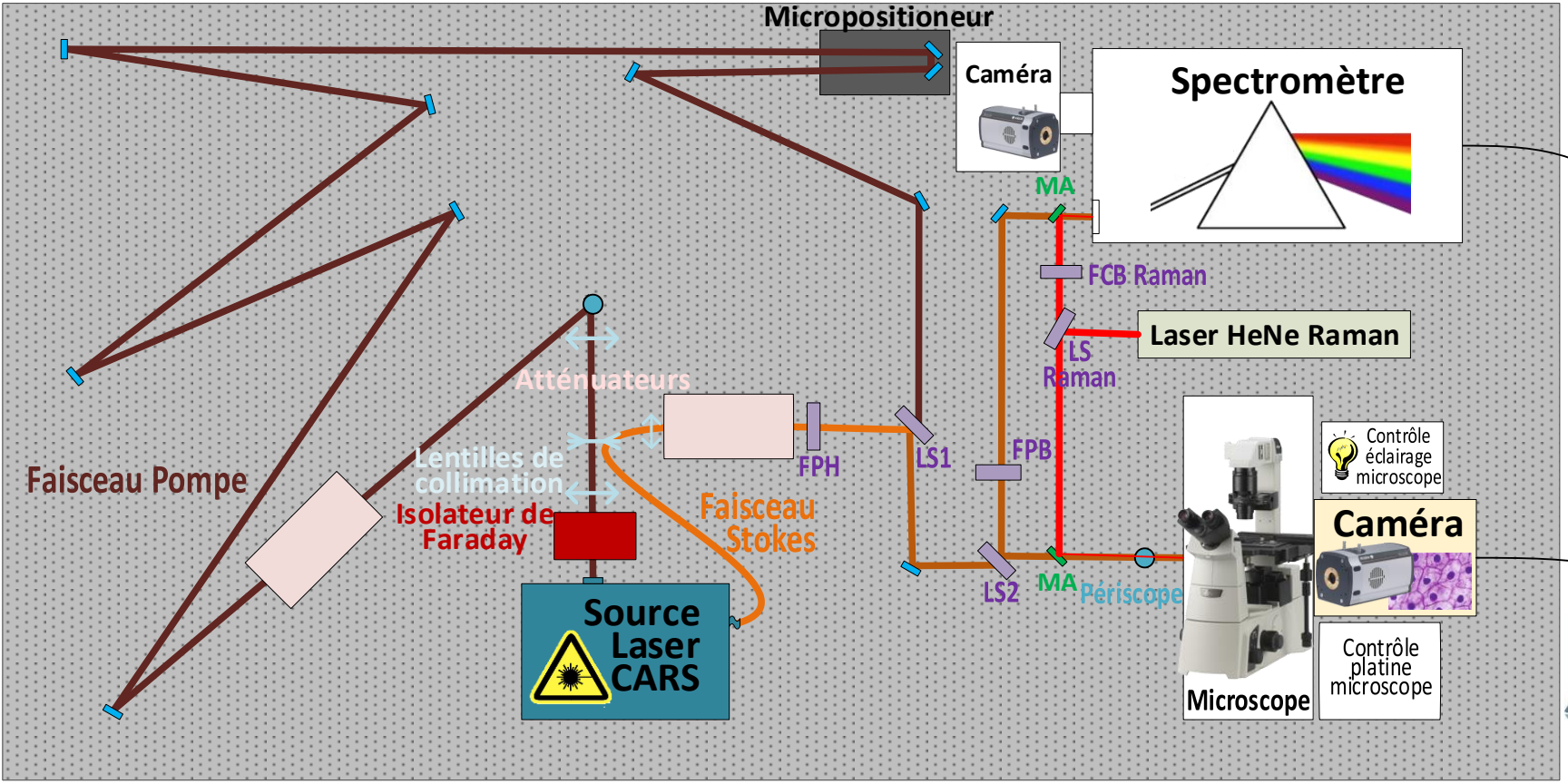


Banc optique





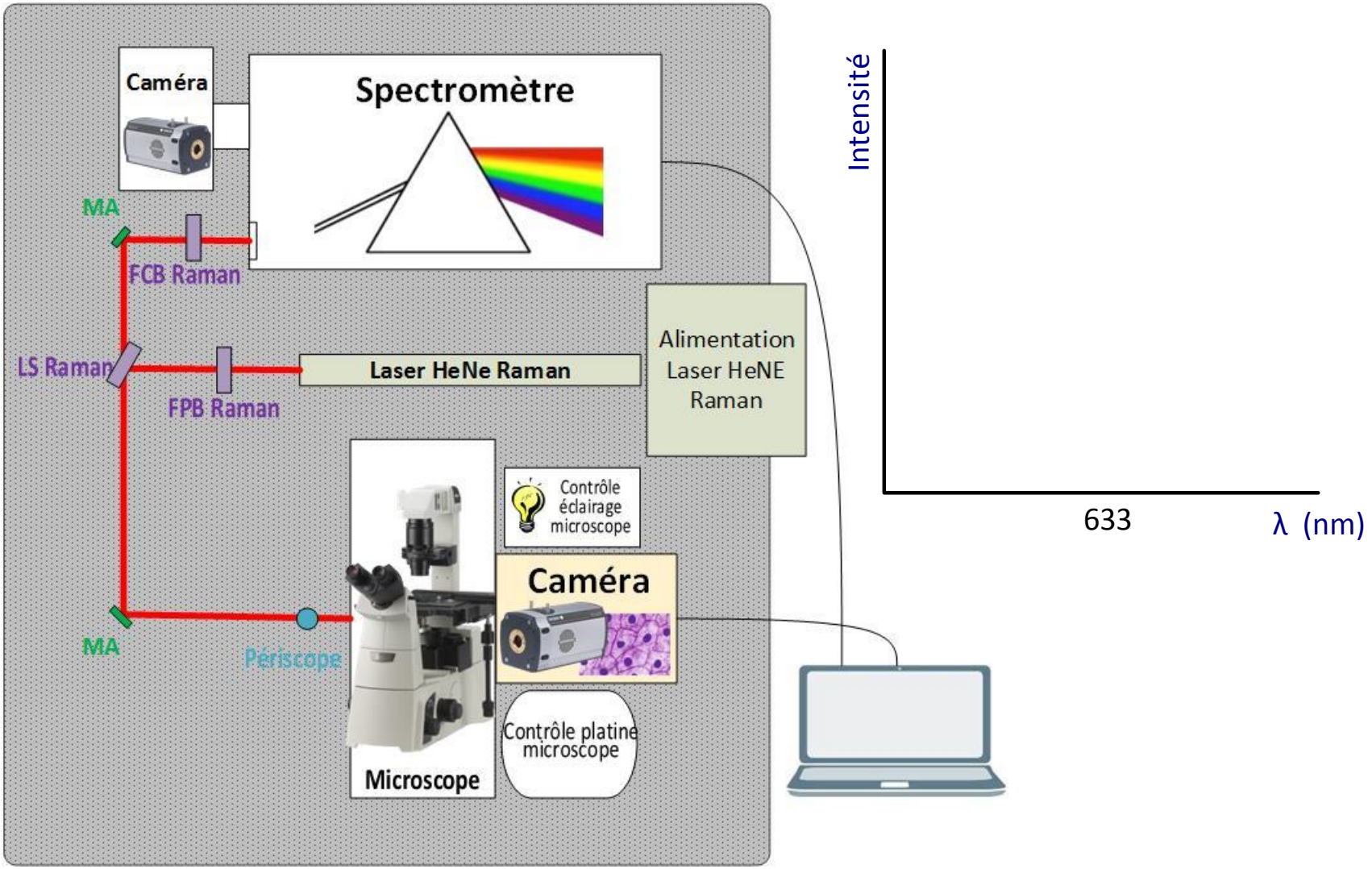
Banc optique



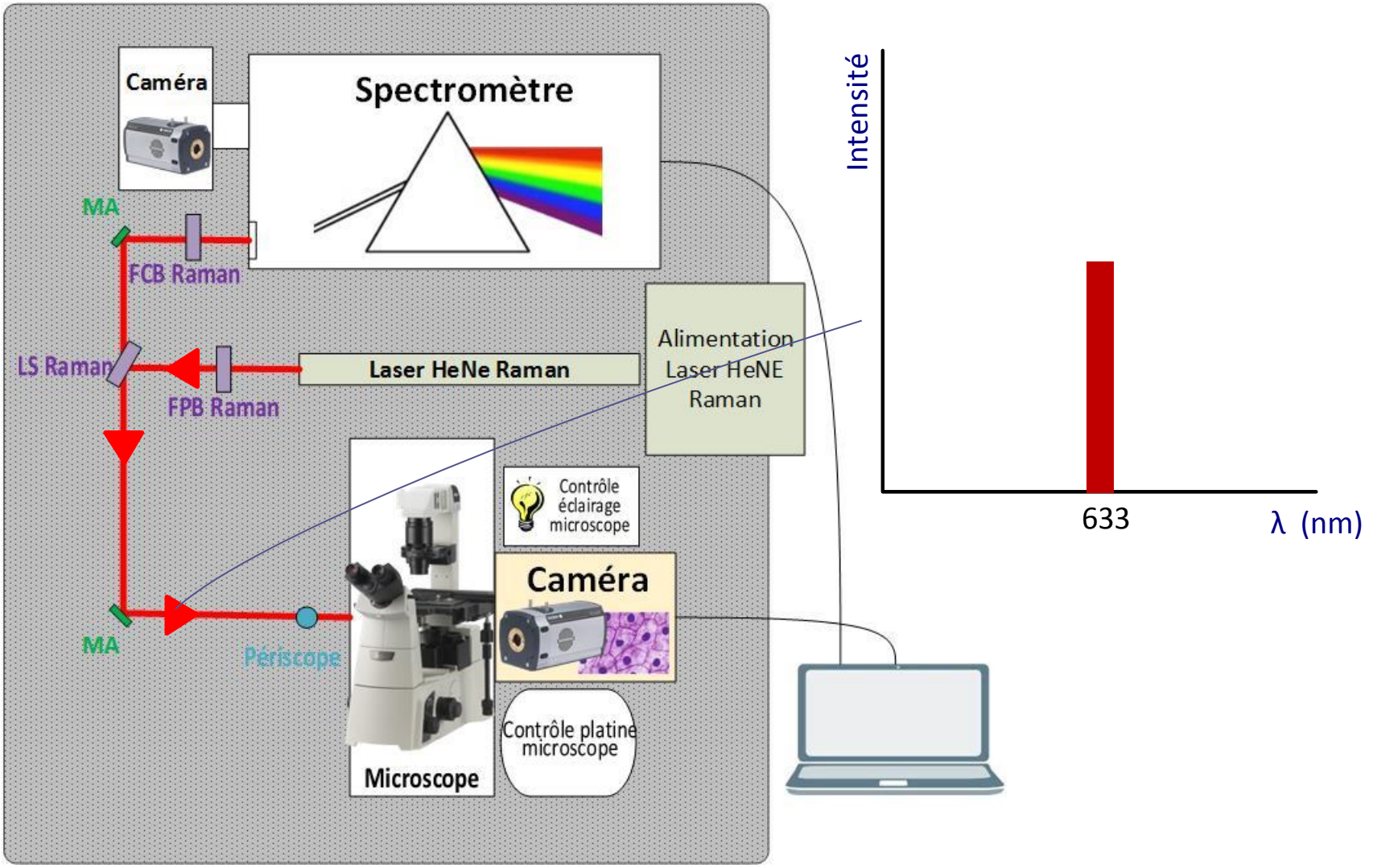
FPH: filtre passe-haut, LSD: lame séparatrice dichroique, FPB: filtre passe-bas

MA: miroirs amovibles

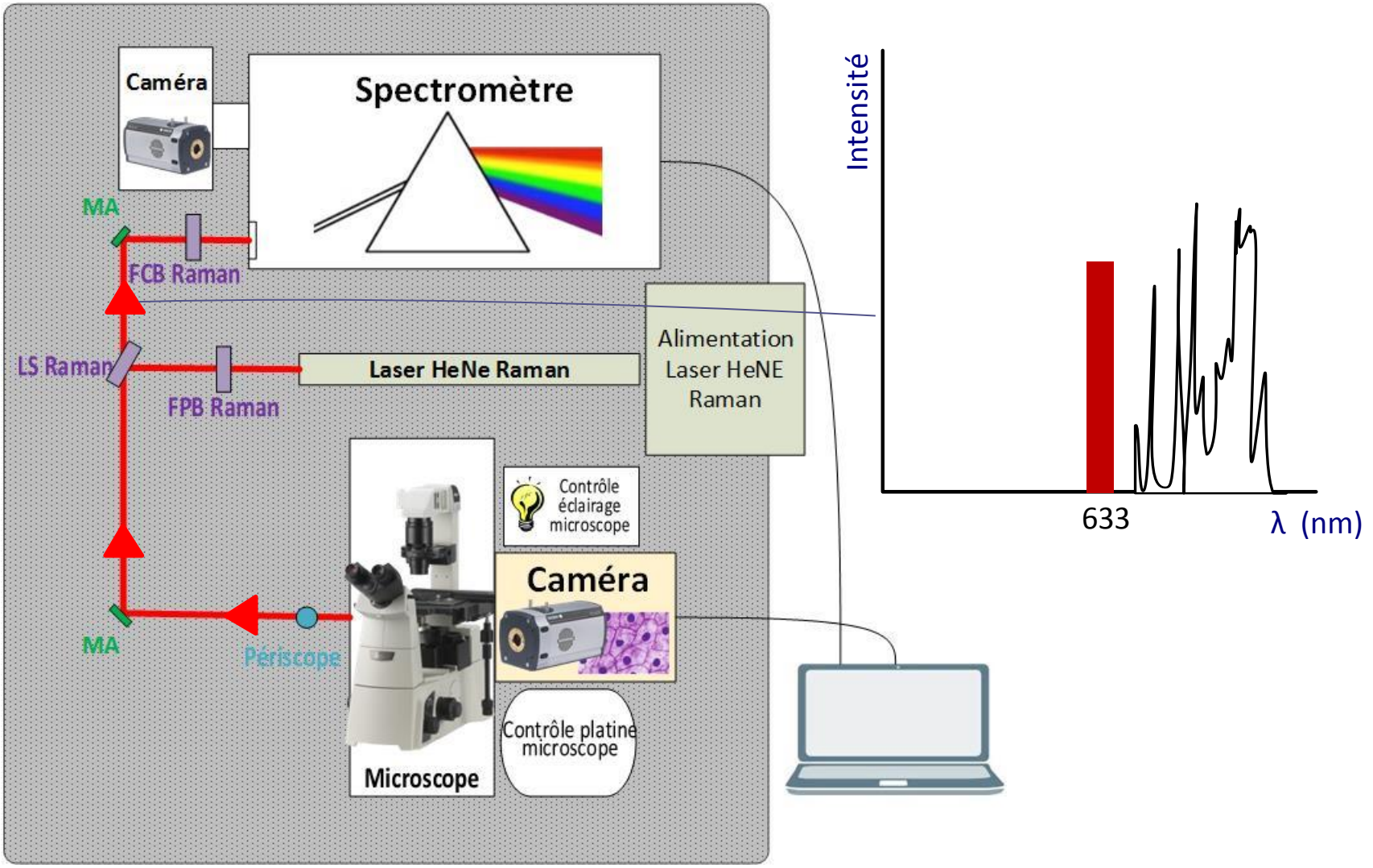
Dispositif Raman spontanné: détails



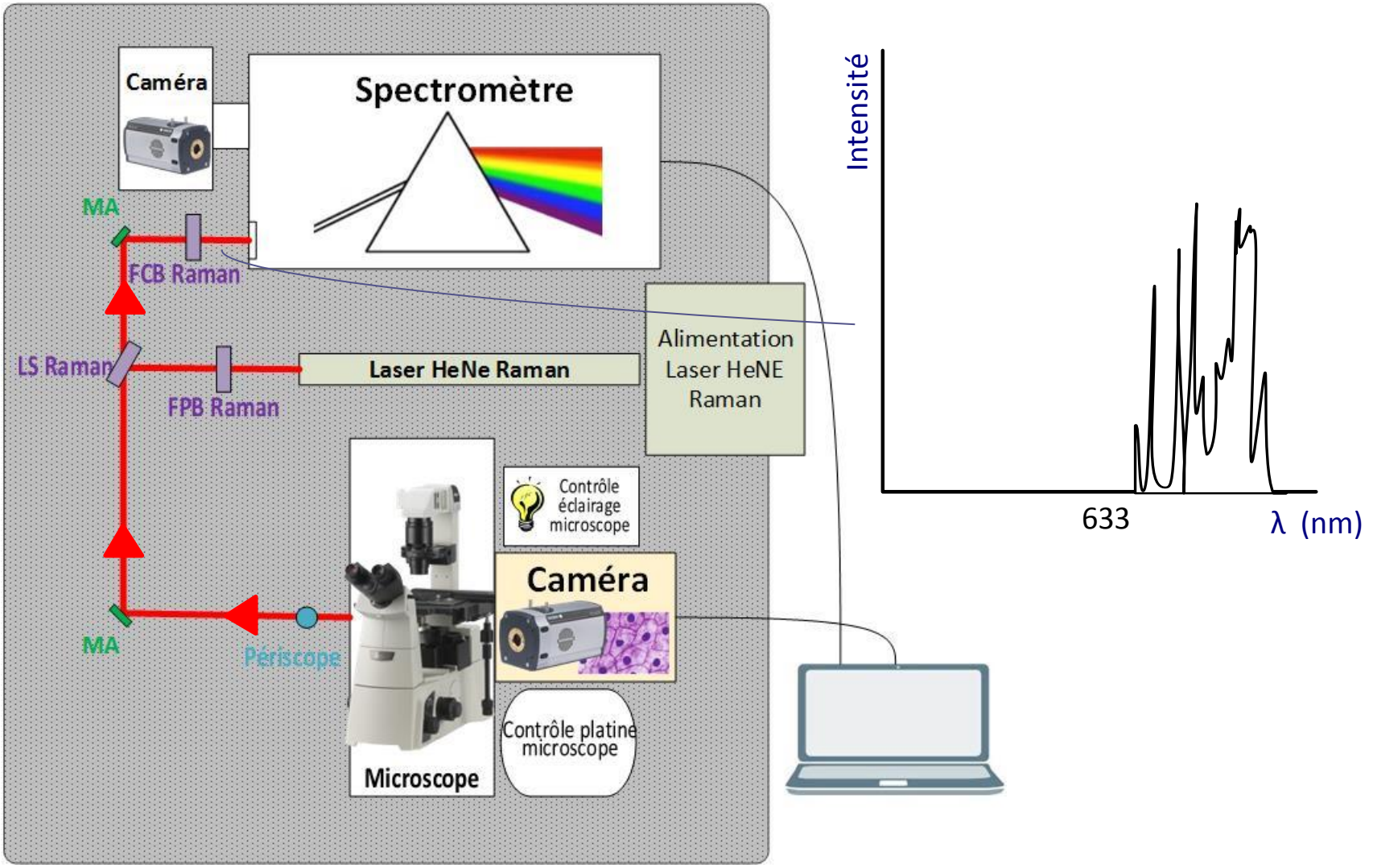
Dispositif Raman spontanné: détails



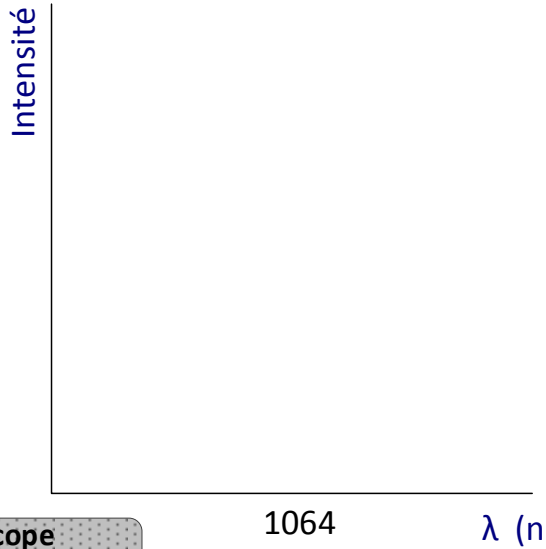
Dispositif Raman spontanné: détails

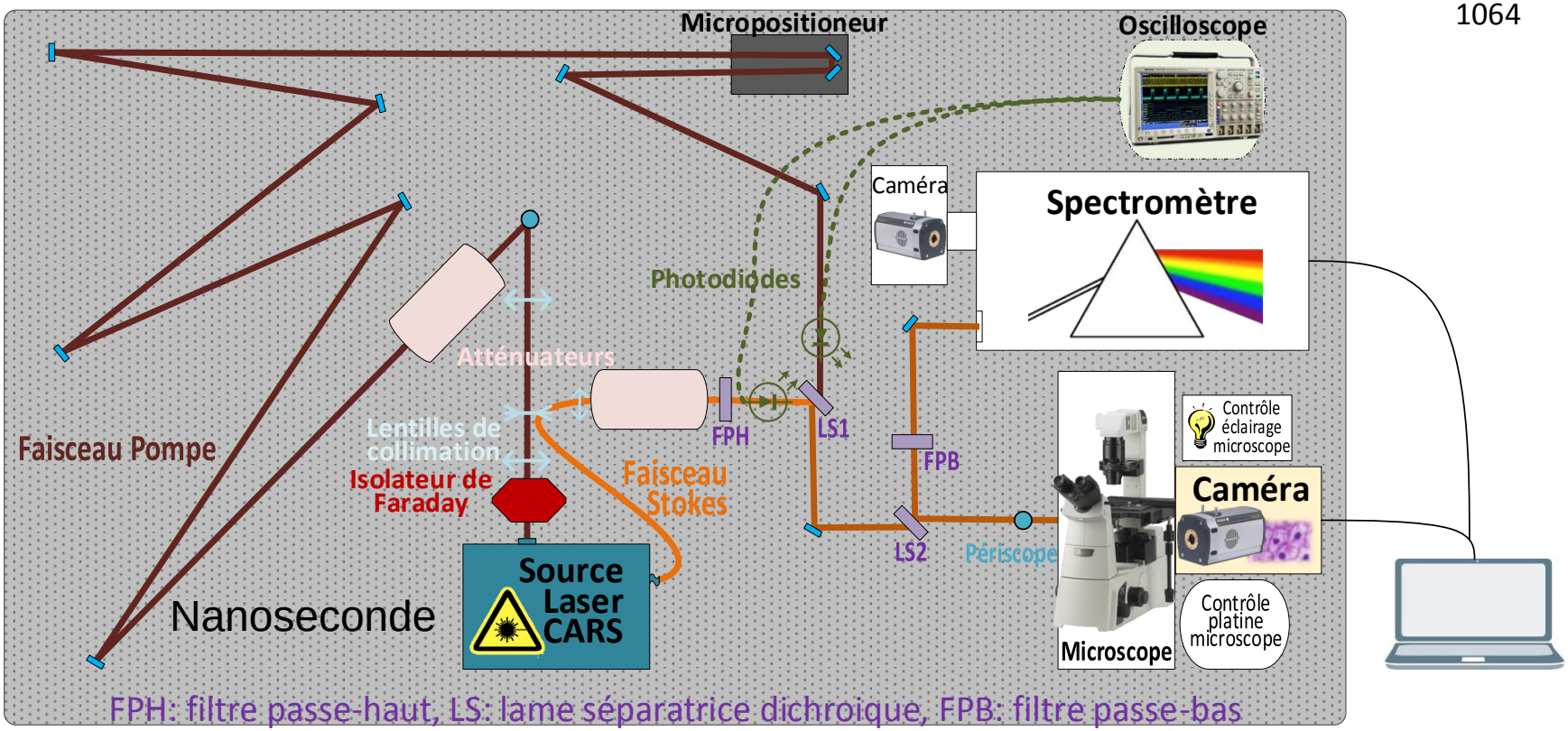


Dispositif Raman spontanné: détails



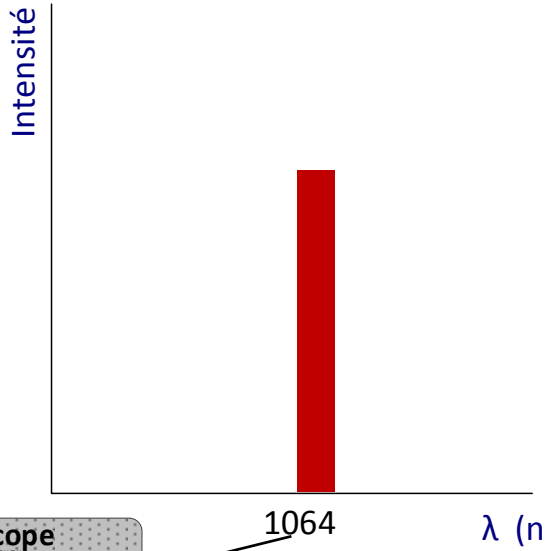
Dispositif CARS: détails

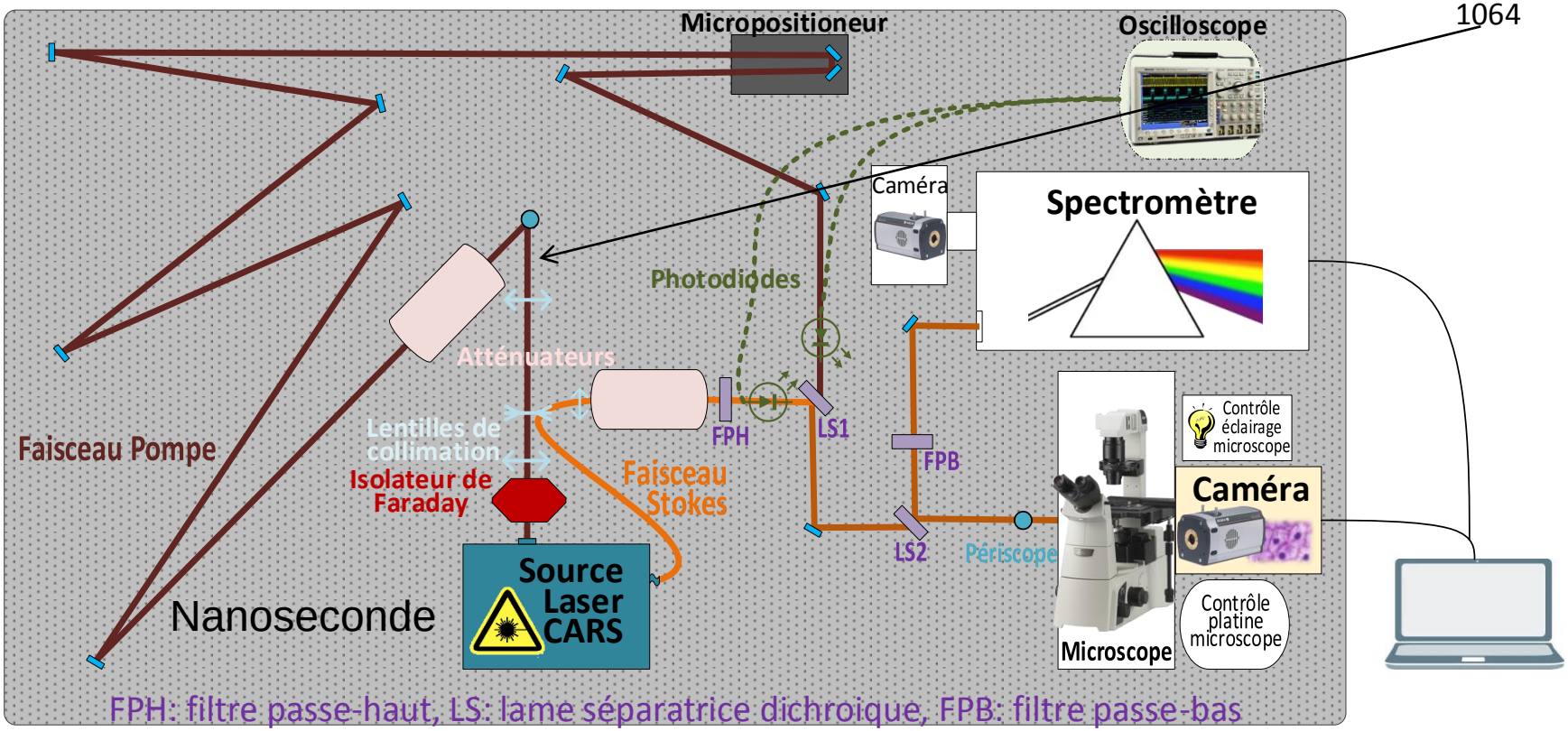




FPH: filtre passe-haut, LS: lame séparatrice dichroique, FPB: filtre passe-bas

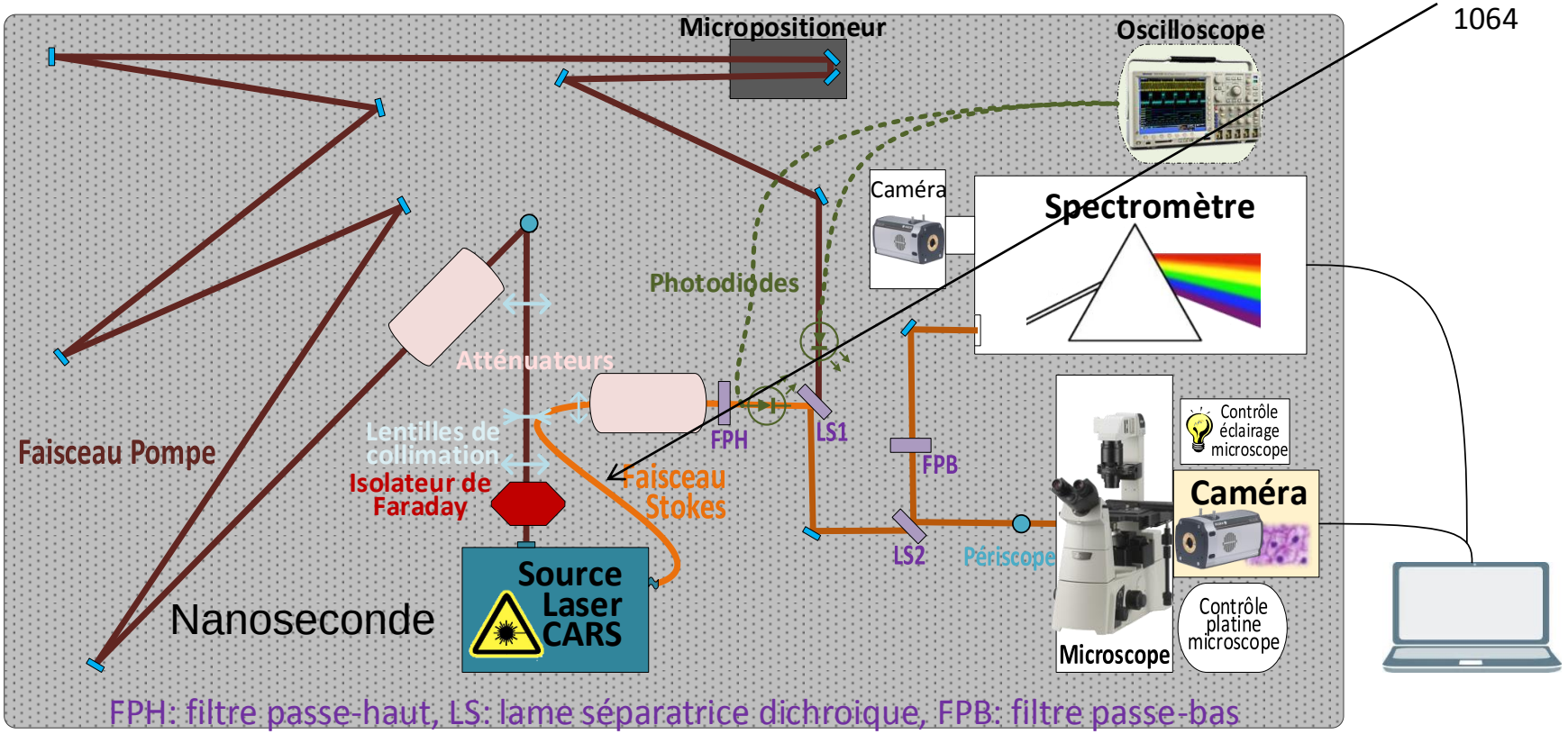
Dispositif CARS: détails

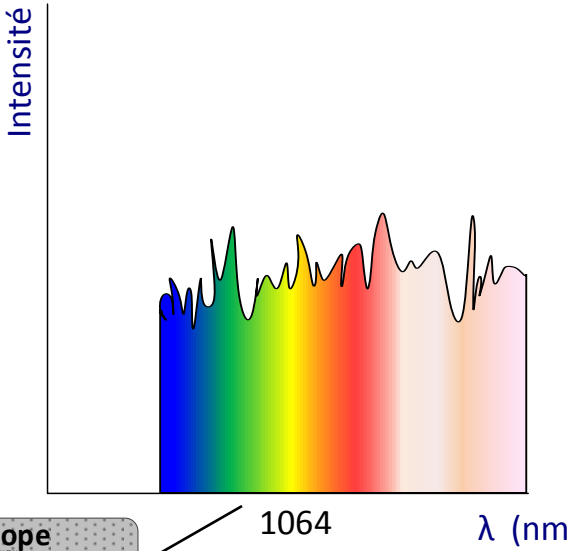




FPH: filtre passe-haut, LS: lame séparatrice dichroique, FPB: filtre passe-bas

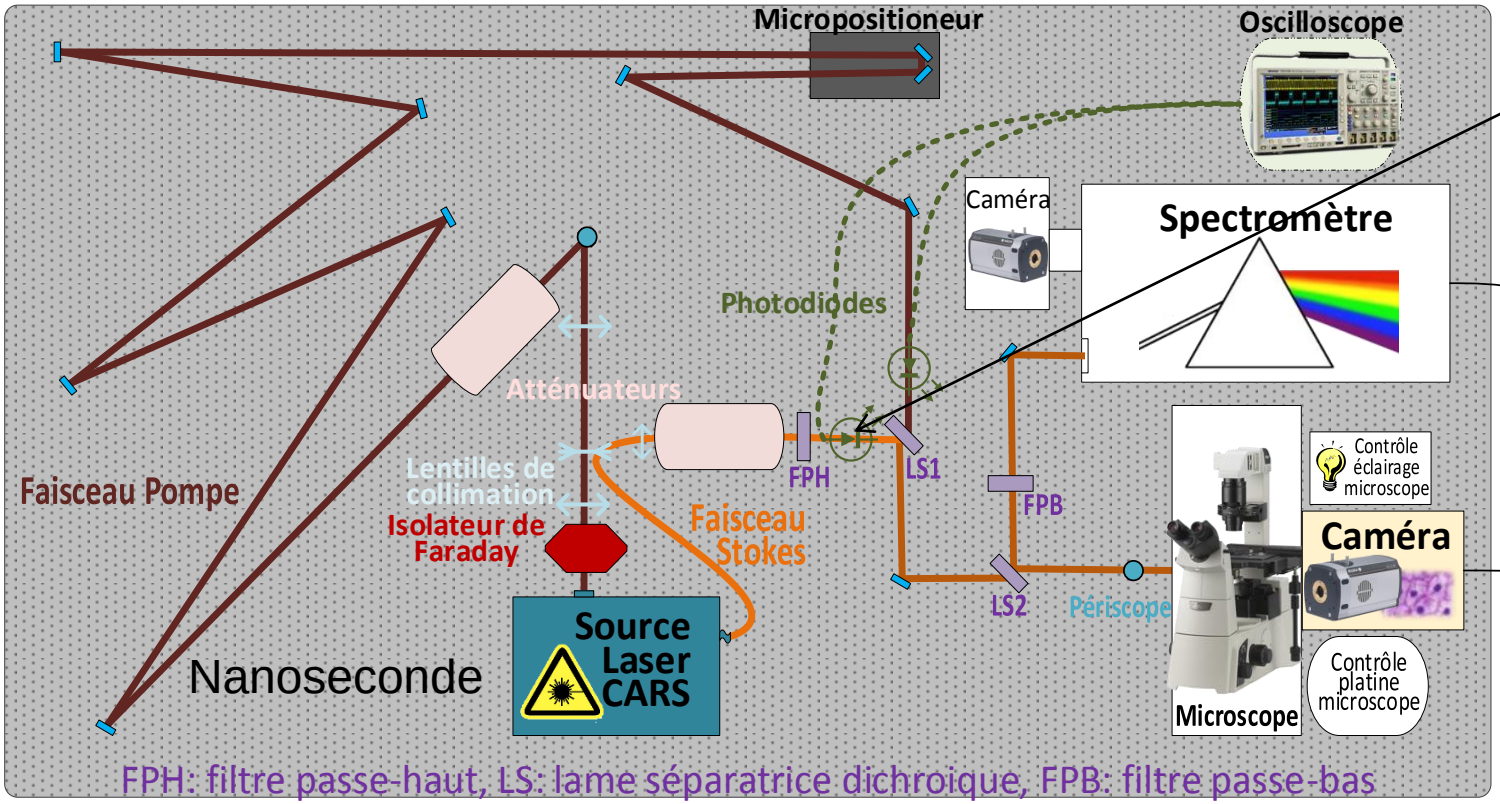
Dispositif CARS: détails

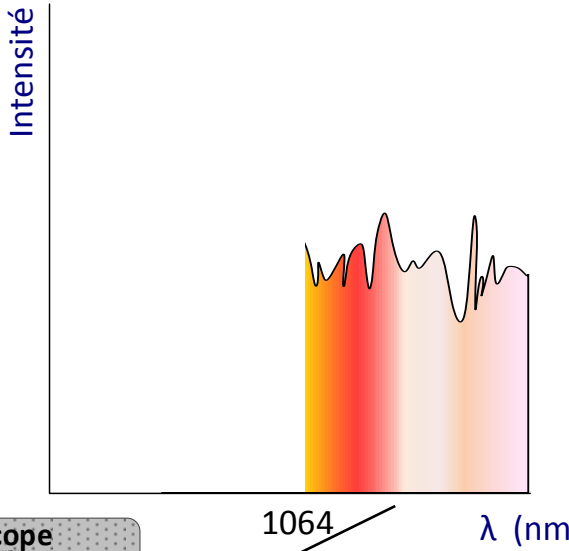




FPH: filtre passe-haut, LS: lame séparatrice dichroique, FPB: filtre passe-bas

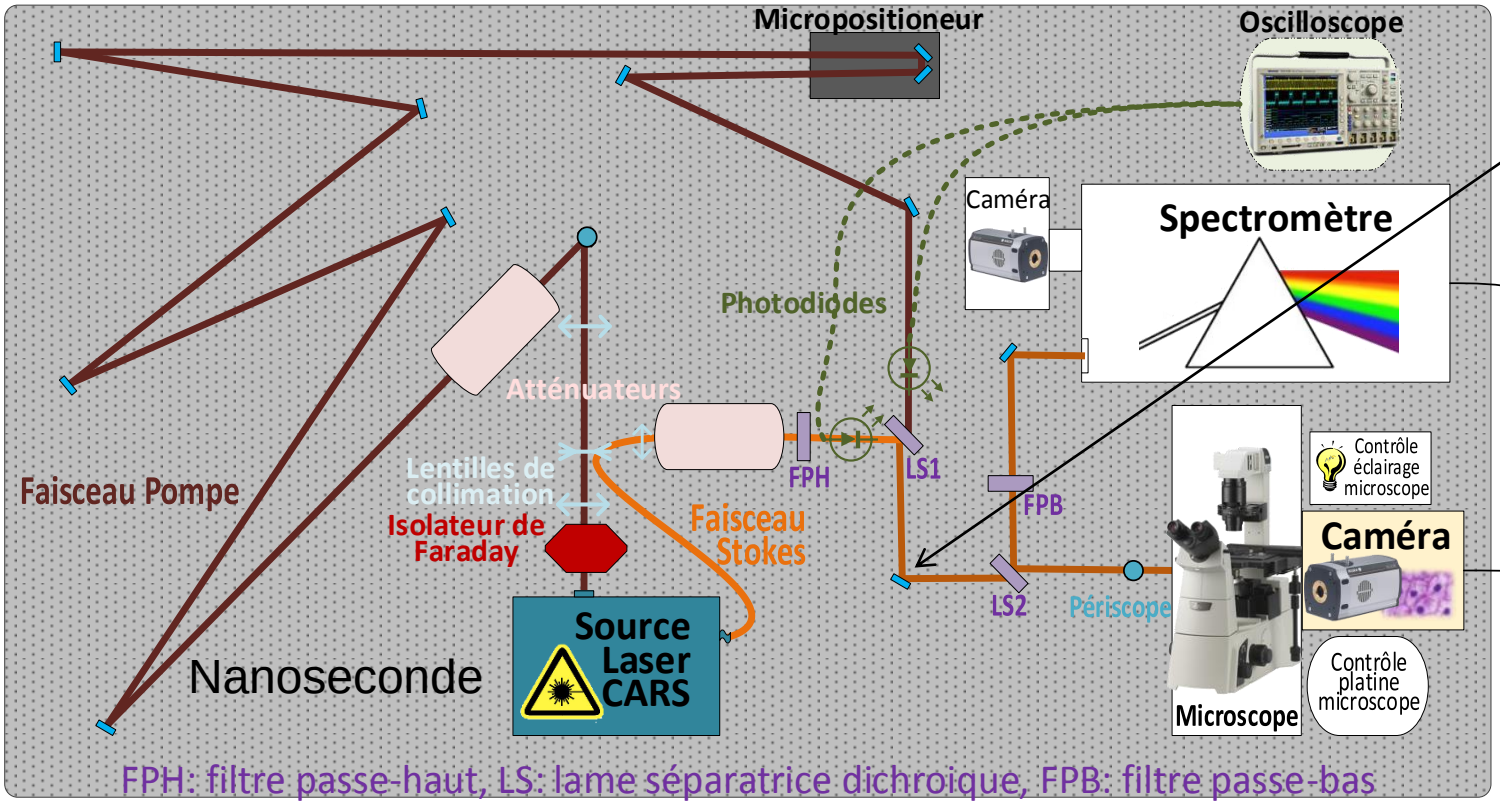
Dispositif CARS: détails

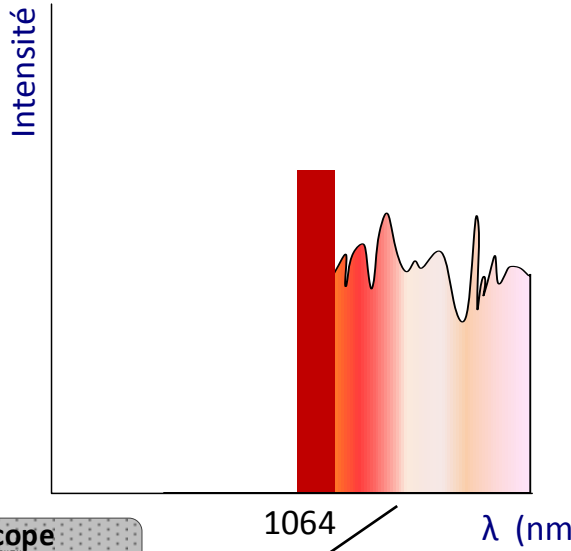




FPH: filtre passe-haut, LS: lame séparatrice dichroique, FPB: filtre passe-bas

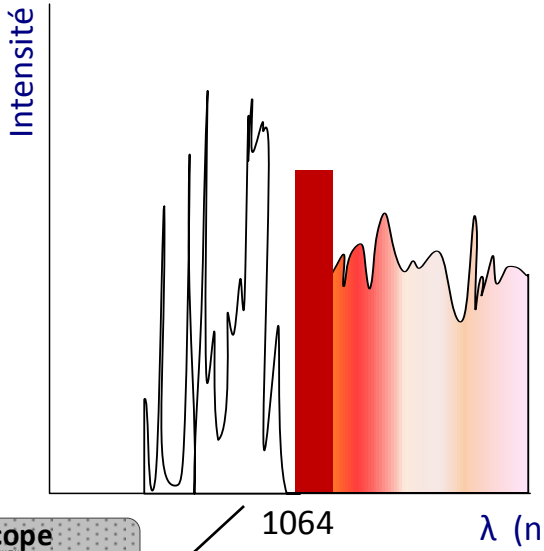
Dispositif CARS: détails





FPH: filtre passe-haut, LS: lame séparatrice dichroique, FPB: filtre passe-bas

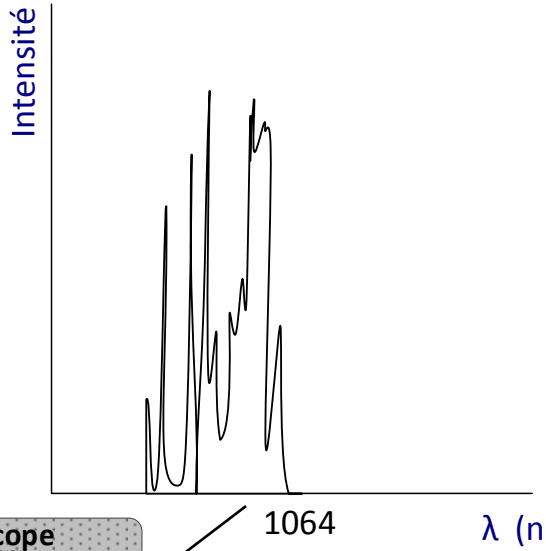
Dispositif CARS: détails

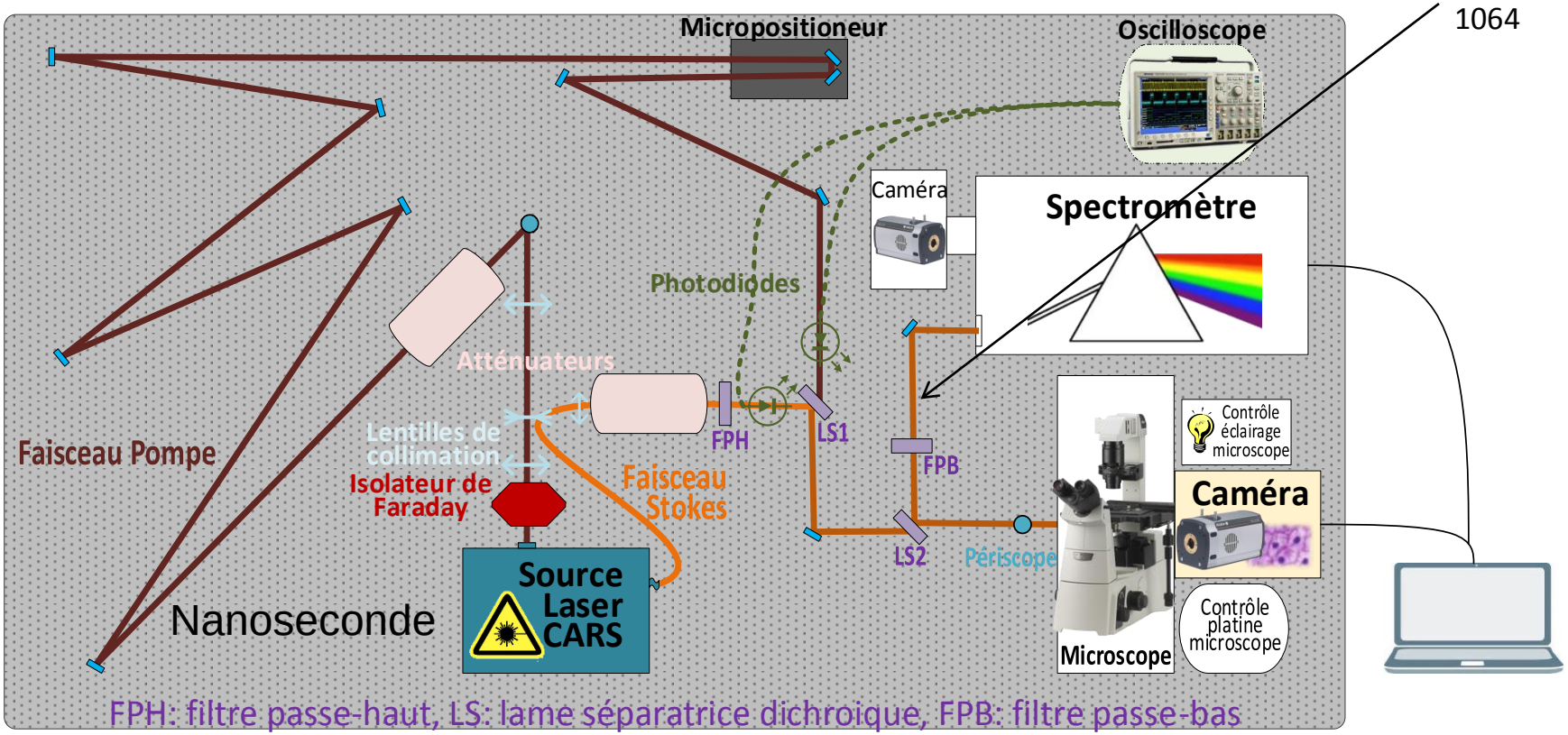


Micropositioneur
Oscilloscope
Caméra
Spectromètre
Photodiodes
Atténuateurs
Faisceau Pompe
Lentilles de collimation
Isolateur de Faraday
FPH
LS1
FPB
Faisceau Stokes
Contrôle éclairage microscope
Caméra
LS2
Périscope
Source Laser CARS
Nanoseconde
Contrôle platine microscope
Microscope

FPH: filtre passe-haut, LS: lame séparatrice dichroique, FPB: filtre passe-bas

Dispositif CARS: détails





FPH: filtre passe-haut, LS: lame séparatrice dichroique, FPB: filtre passe-bas

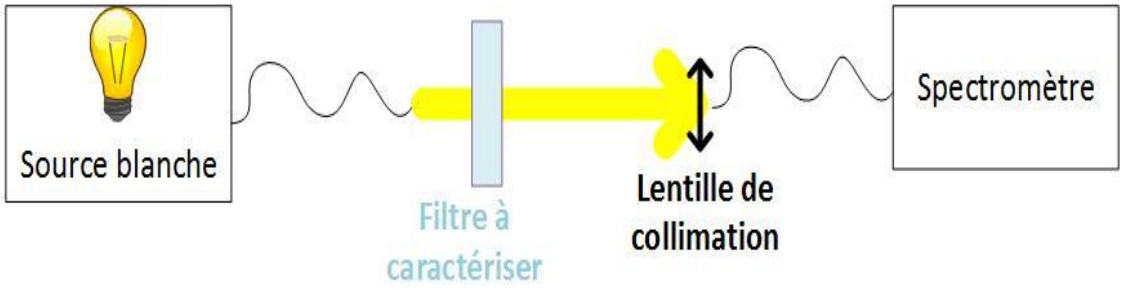
Banc optique: étapes du montage

Choix et achat des composants

Banc optique: étapes du montage

Choix et achat des composants

Caractérisation des composants

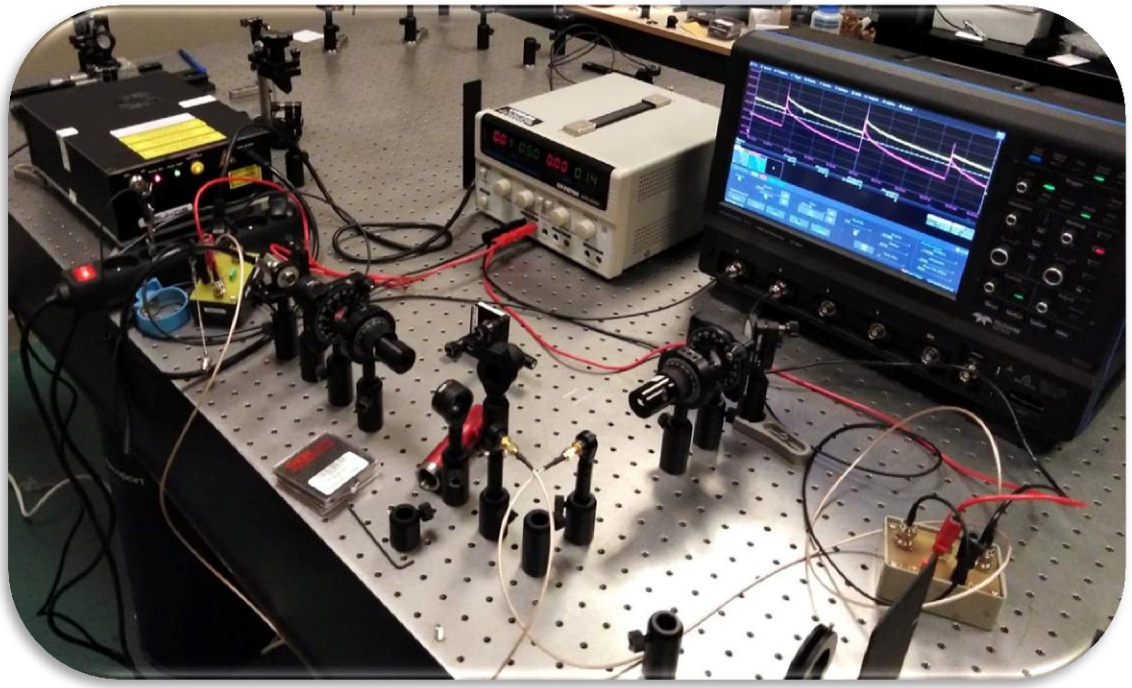


Banc optique: étapes du montage

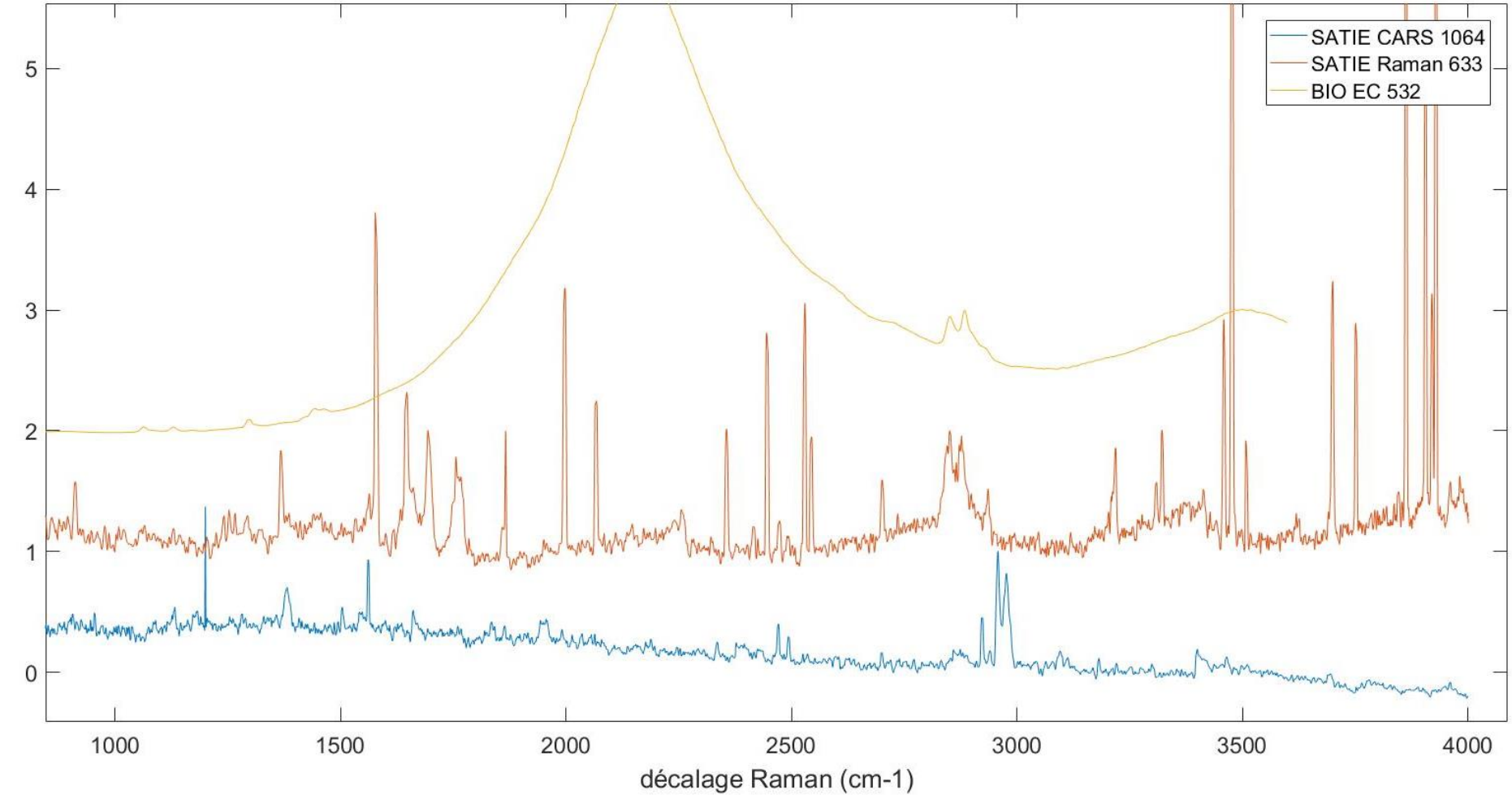
Choix et achat des composants

Caractérisation des composants

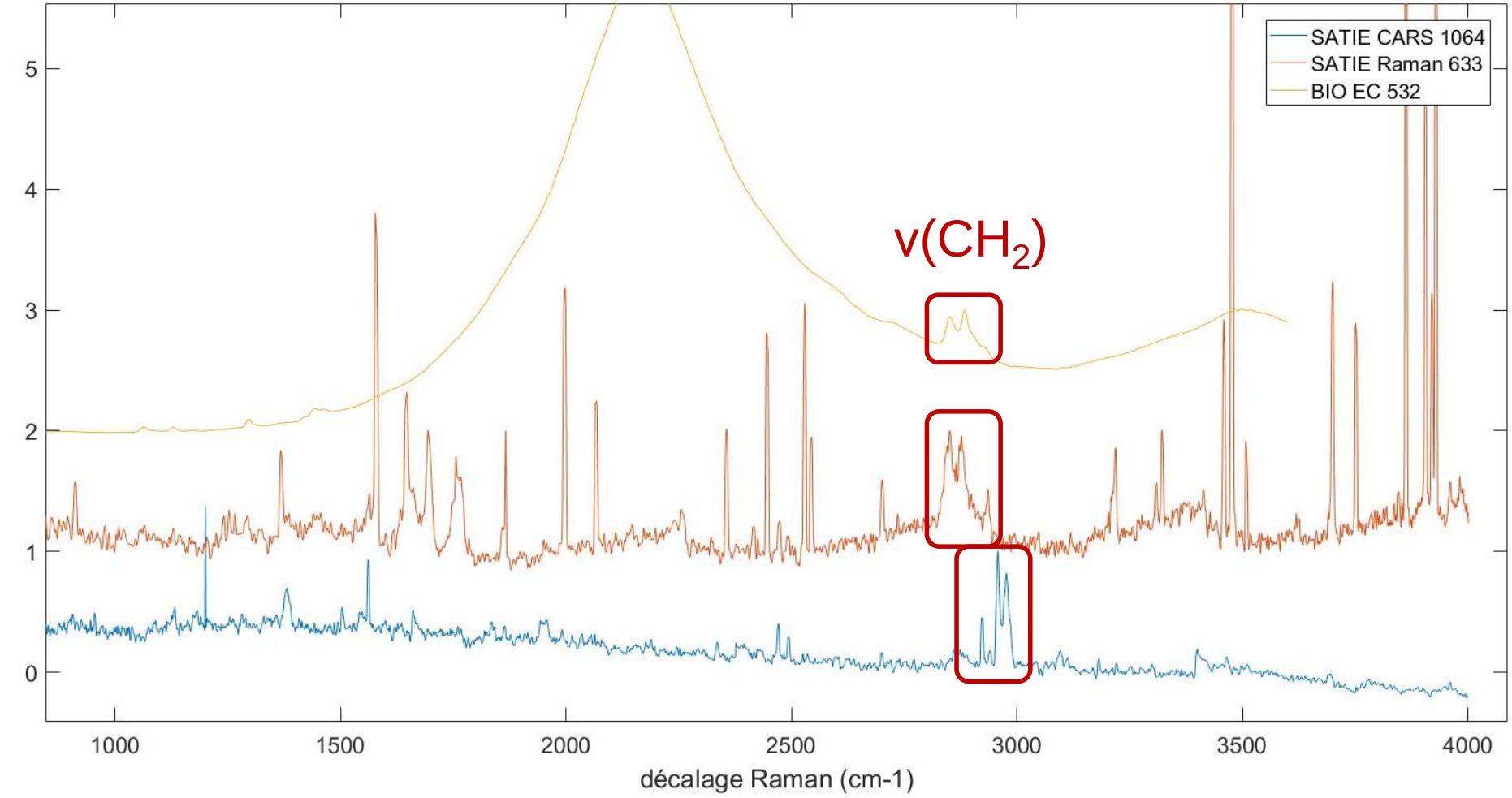
Assemblage et alignement optique



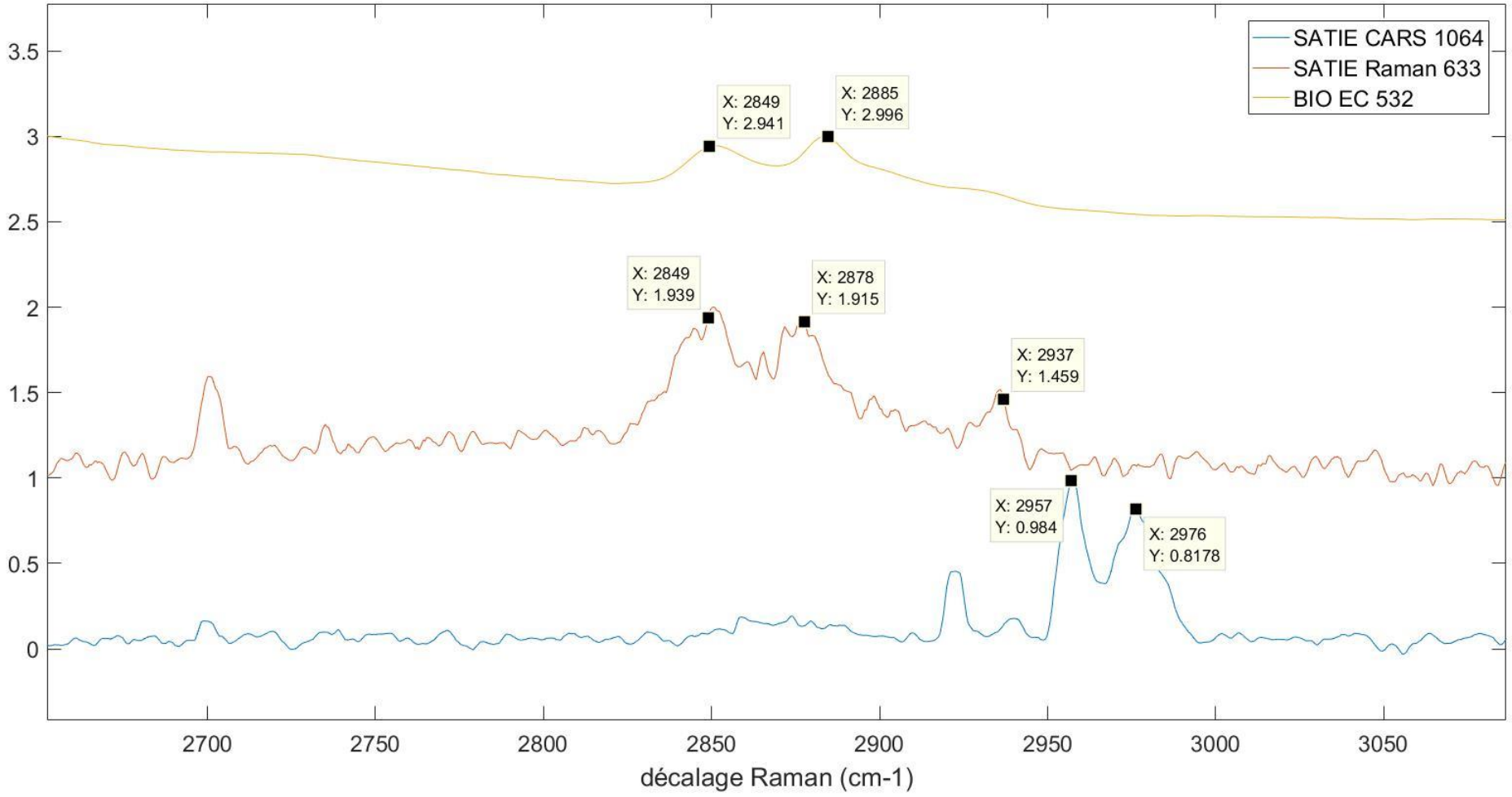
Premiers résultats: échantillon de plastique



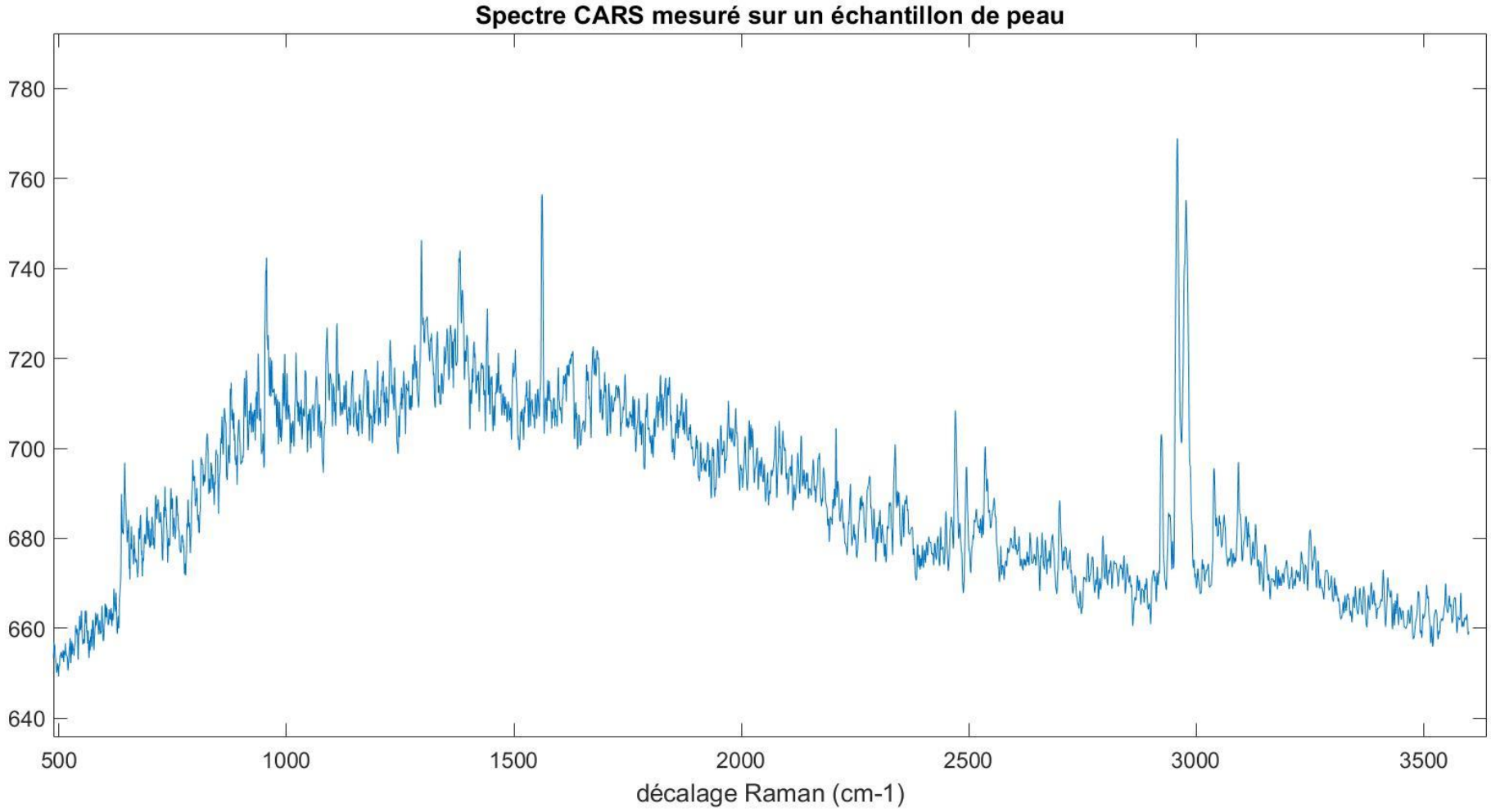
Premiers résultats: échantillon de plastique



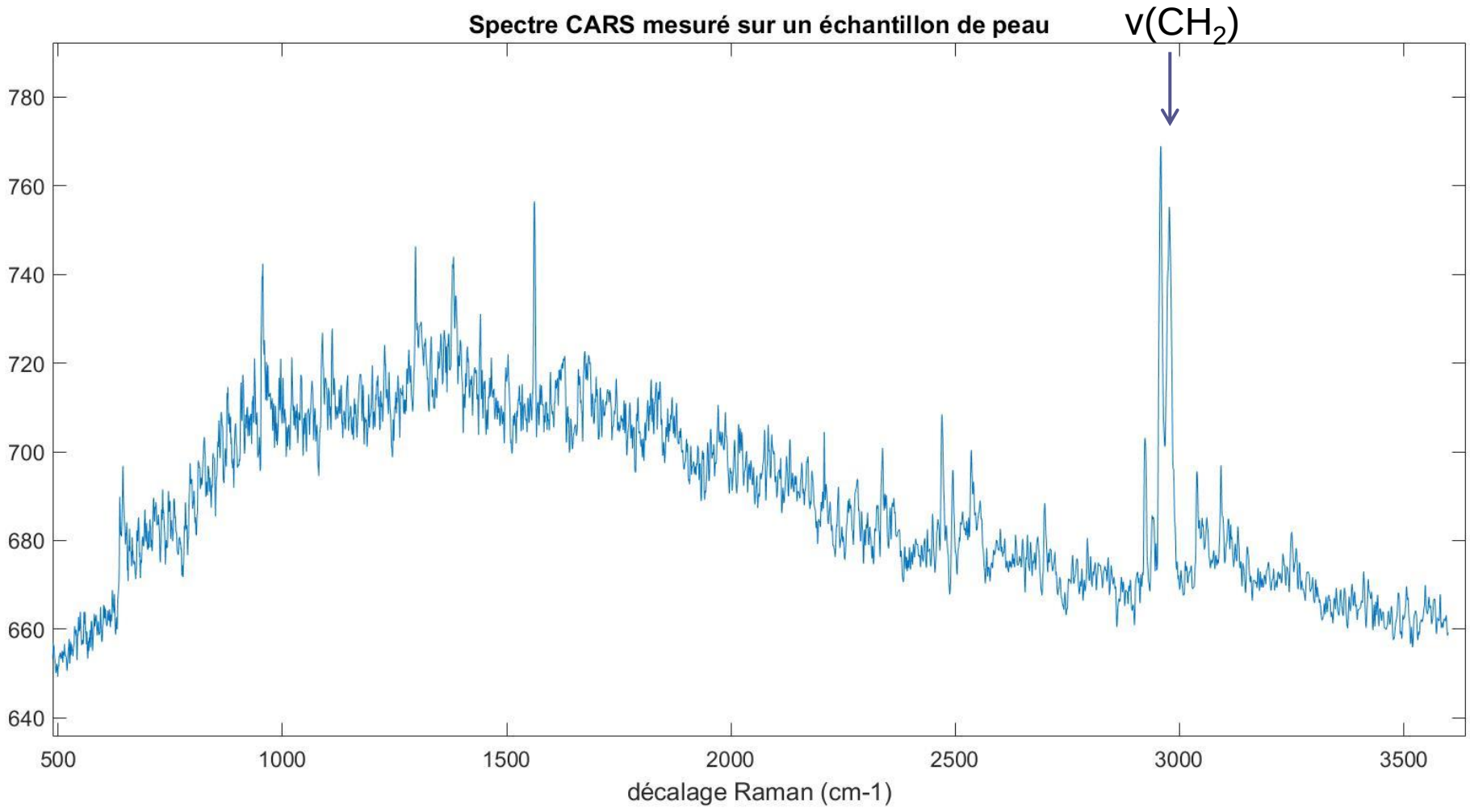
Premiers résultats: échantillon de plastique



Premiers résultats: échantillon de peau



Premiers résultats: échantillon de peau

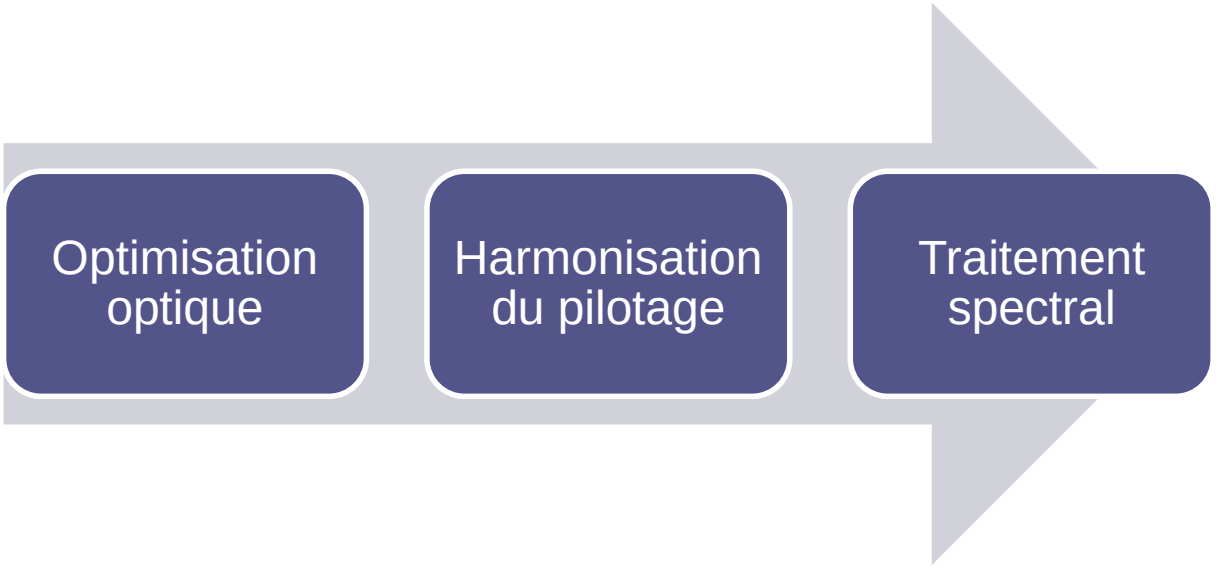


Conclusions & perspectives

Banc optique permettant à la fois des mesures de spectres Raman et CARS

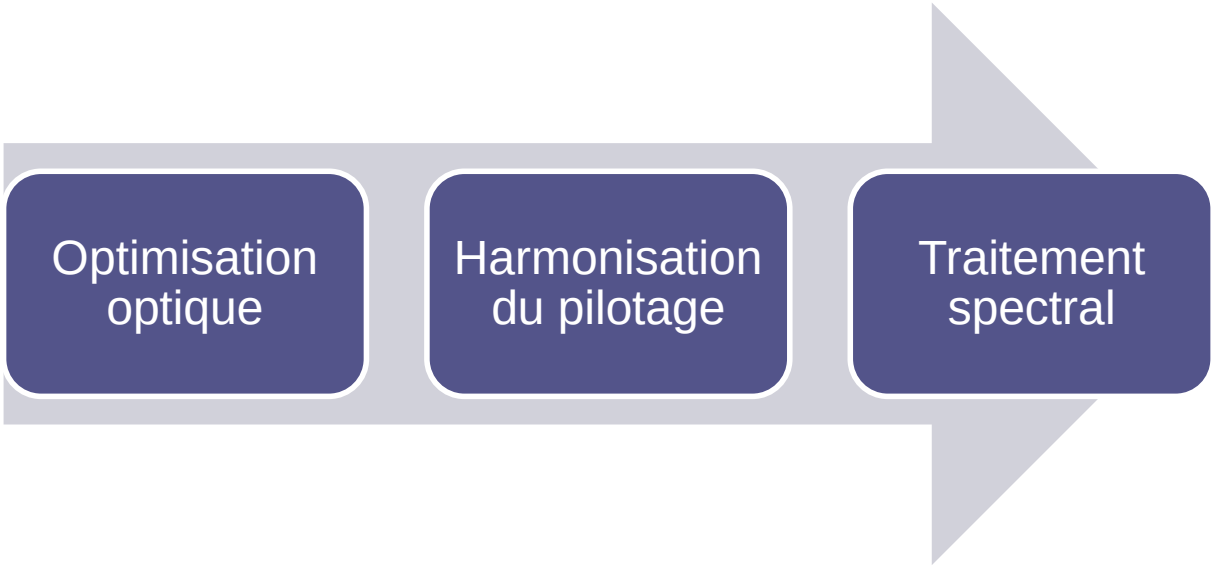
Conclusions & perspectives

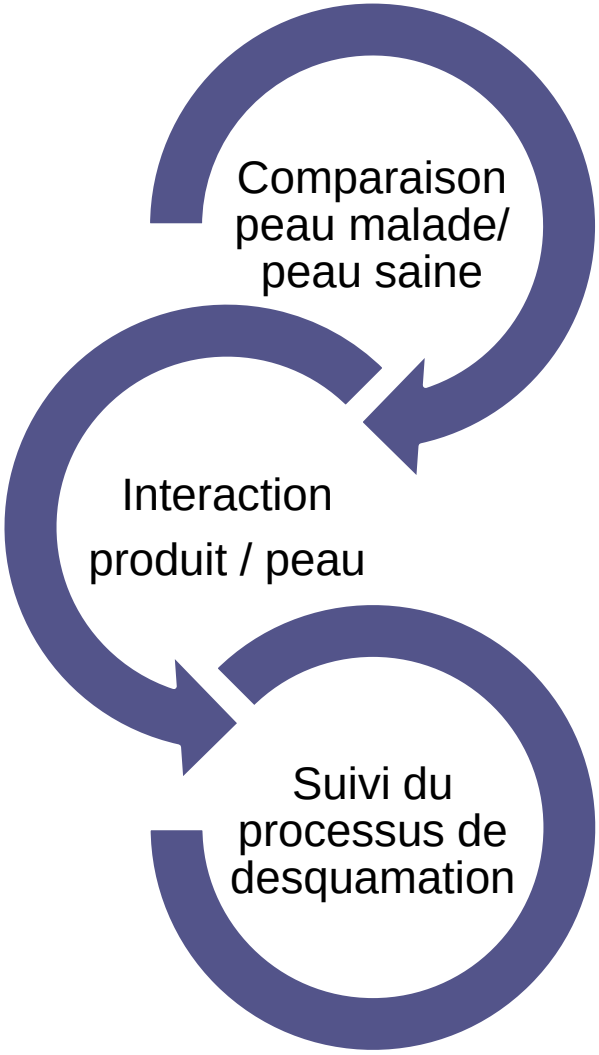
Banc optique permettant à la fois des mesures de spectres Raman et CARS



Conclusions & perspectives

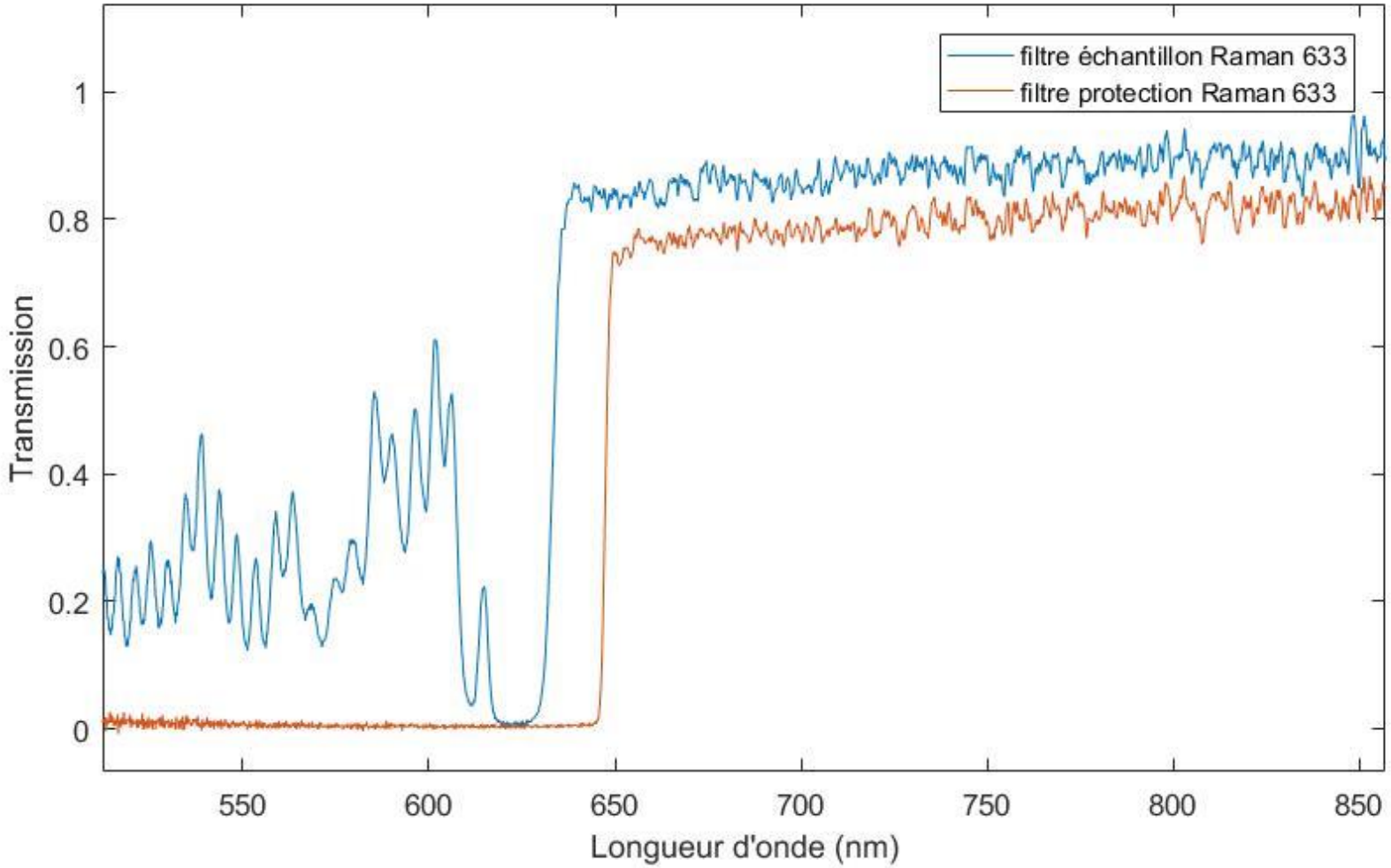
Banc optique permettant à la fois des mesures de spectres Raman et CARS



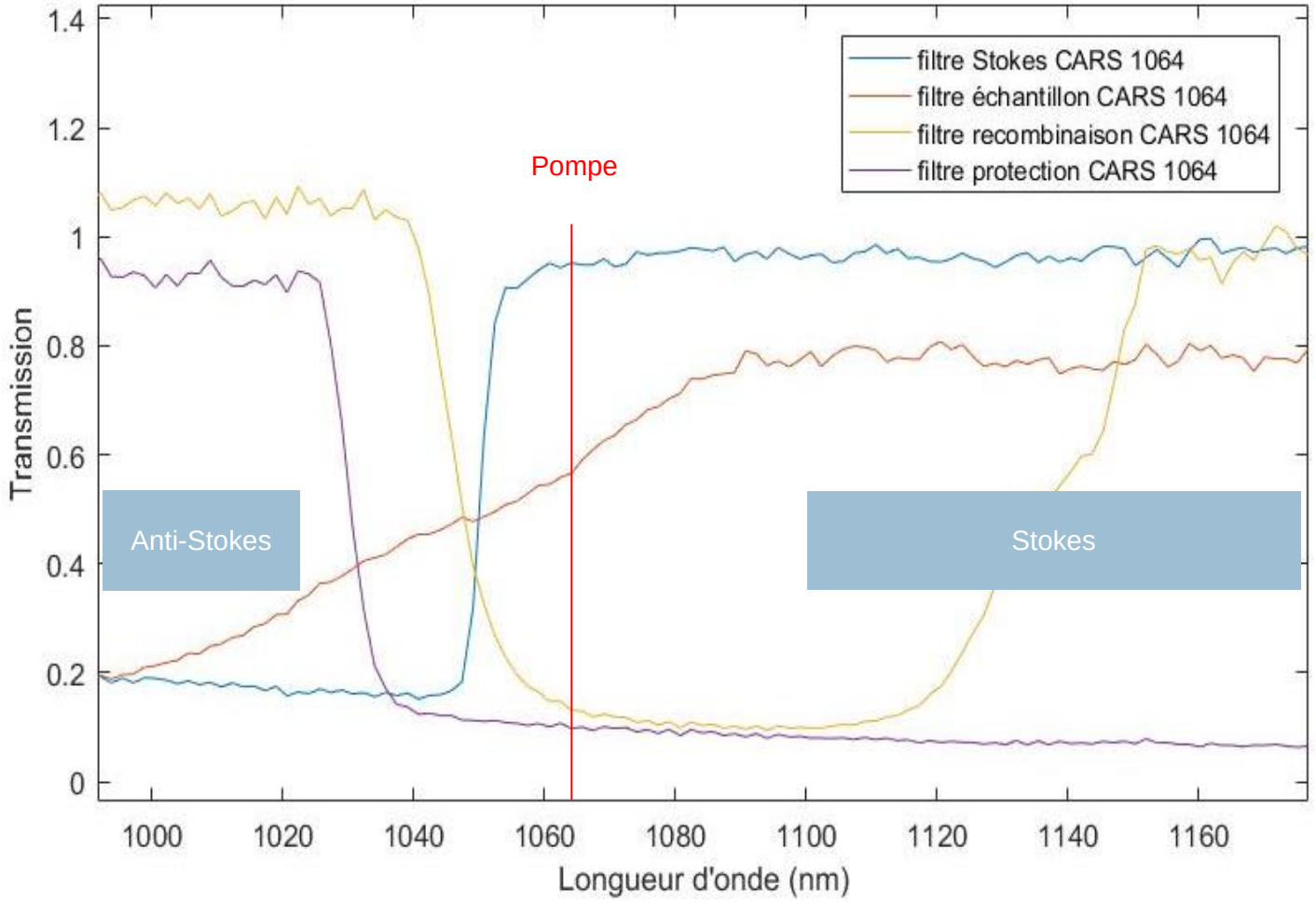


MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Caractérisation des filtres



Caractérisation des filtres CARS



Caractéristiques de la source CARS

	Specs.	Measured	Result	
FIBER OUTPUT CHARACTERISTICS				
Spectrum Bandwitdh (nm)	1000-2000	**600-2050**	PASS	*1*
Total Average Power (mW)	> 50	**131**	PASS	*2*
Repetition Rate (kHz)	~ 30	**~ 30.4**	PASS	*3*
Pulse Width (ns)	~ 1	**~ 1.2**	PASS	
Spatial Mode	Singlemode	**LP_{01} mode**	PASS	*4*
Output Connector	FC-APC		PASS	
Power Stability	< ± 2%	**0.5 %**	PASS	*5*
FREE SPACE OUTPUT CHARACTERISTICS				
Spectrum wavelength (nm)	~1064	**1063.95**	PASS	*6*
Total Average Power (mW)	> 50	**110**	PASS	*2*
Average power stability	< ± 2%	**0.5 %**	PASS	*5*
Repetition Rate (kHz)	~ 30	**~ 30.4**	PASS	*3*
Pulse Width (ns)	~ 1	**~ 1.2**	PASS	
Collimated beam diameter X (µm)	NA	**130**	-	*7*
Collimated beam diameter Y (µm)	NA	**123**	-	*7*
M^2 value	<1.2	**1.15**	PASS	
Time delay vs 1064nm output (ns)	NA	**~ 20**	-	*8*

Caractéristiques de la détection

	Description
CAMERA n°1	**BLAZE 100 HR**
Type de technologie	CCD back-ill, deep depletion HR silicon
taille de pixels	20 x 20 µm
nombre de pixels	1340 x 100
rendement quantique à 740 nm	95%
rendement quantique à 900 nm	97%
rendement quantique à 1020 nm	70%
bruit de lecture	< 3 e-
courant d'obscurité	0,0015 e-/pixel/seconde
temps d'intégration minimum possible	< 100µs
type de refroidissement	thermoélectrique -95°C
vitesse de lecture	de 100kHz à 2x 16MHz

SPECTROMETRE	HRS-500
Type	Czerny Turner corrigé
Meilleure résolution atteignable aux longueurs d'onde d'interet et avec quel réseau	0,04 nm avec un 1500tr/mm 0,05 nm avec un 1200 tr/mm
focale	500 mm
temps pour réaliser un spectre complet (400-4000 cm-1, soit 746-1020nm) avec le réseau permettant une bande passante de 70 nm	il faut 4 acquisitions pour couvrir 746-1020nm Le temps de changement de champ (déplacement réseau et initialisation CCD) est de 1 seconde maximum par champ. Le temps "perdu" est donc de 4s maximum. Ensuite s'ajoute de temps d'exposition du détecteur : si on pose 1 seconde, alors le temps total sera de 4s + 4s = 8s
RESEAU 1	
nombre de traits/mm	600 tr/mm
résolution	0,12 nm
bande passante	81 nm
RESEAU 2	
nombre de traits/mm	1200 tr/mm
résolution	0,05 nm
bande passante	33 nm

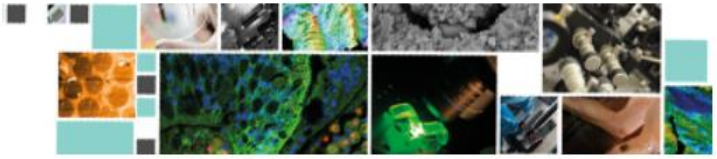
Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives

Talence – Le 29 janvier 2019

ADAPTATION ET MODIFICATION D'UN PILOTE INSTRUMENTÉ SEMI-INDUSTRIEL COMBINANT CHAUFFAGE MICRO-ONDES ET CENTRIFUGATION POUR EXTRAIRE DES VÉGÉTAUX.

Alice ANGOY

3ième année de thèse (Janv. 2017- Déc. 2019)



C2i 2019 : 8ième colloque interdisciplinaire en instrumentation

1- Contexte

- Principes de l'Eco-Extraction

1- Sélectionner des ressources végétales renouvelables

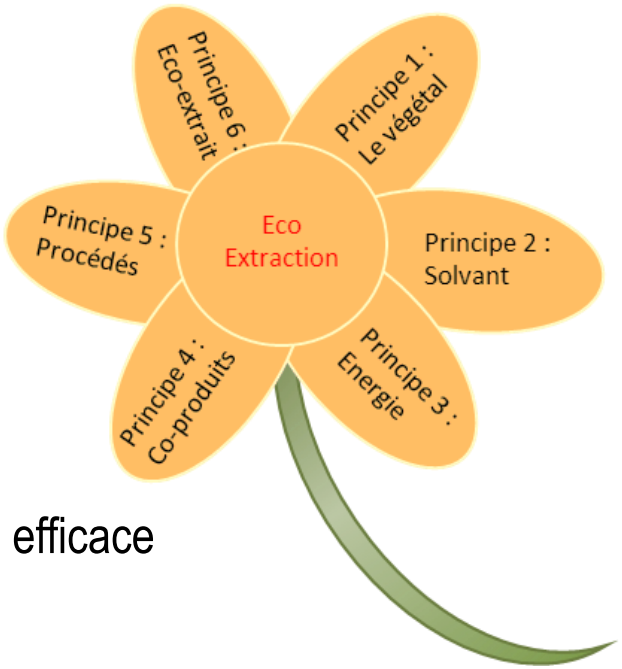
2- Utiliser des solvants agro-sourcés

3- Minimiser la consommation d'énergie

4- Valoriser les co-produits

5- Définir le process adapté le plus efficace

6- Obtenir un éco-extrait



Principes de l'Eco-Extraction

- **<u>Objectif</u> :** Combiner des effets mécanique et thermique pour intensifier l'Eco-Extraction

- *F. Chemat, Eco-extraction du végétal, 2011, Dunod*

1- Contexte

- Extraction assistée par micro-ondes

•*Superposition d'un effet mécanique*
→Augmentation des rendements avec une faible consommation énergétique

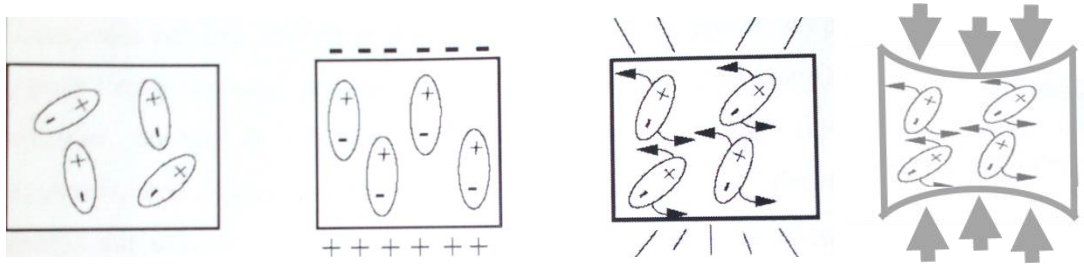
Micro-ondes utilisées depuis 1986 en extraction

Thomas Michel. Nouvelles méthodologies d'extraction, de fractionnement et d'identification : application aux molécules bioactives de l'argousier (Hippophae rhamnoides). Alimentation et Nutrition. Université d'Orléans, 2011. Français. <NNT : 2011ORLE2032>. <tel-00677211>

Différentes techniques avec solvant, gravité, vapeurs d'eau…

Principe

- *Fréquence de 2,45GHz*
- *Polarisation par orientation dipolaire*



Absence de champ électrique | *Application d'un champ électrique continu* | *Application d'un champ électrique haute fréquence* | *Effet mécanique*

Sans solvant

•*Chauffage du liquide intracellulaire*
=
- *explosion de la cellule*

- *F. Chemat, Eco-extraction du végétal, 2011, Dunod*

1- Contexte

- Extraction assistée par Micro-ondes & Centrifugation

Combinaison d'un chauffage diélectrique et de la centrifugation

Conception et instrumentation

Quel est l'intéret de l'ajout d'une force centrifuge pour intensifier l'extraction micro-ondes ?

Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives

La thèse : un partenariat

P. Ginisty
M. Valat & A. Sommier

- Connaissances en métrologie
- Couplage centrifugation/micro-ondes
- Modélisation Comsol®, Labview®
- Maintenance du pilote

Doctorat

De janv 2017 à déc. 2019

F. Chemat
P. Goupy & C. Caris-Veyrat

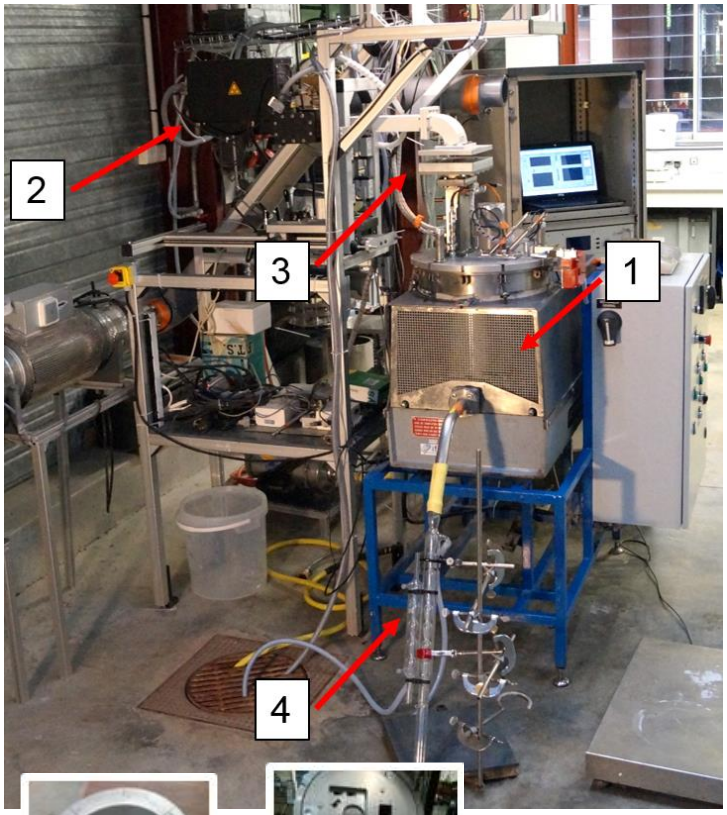
- Expertise en Eco-extraction/Procédés
- Expertise en caractérisation (Chromatographies + Dosages)
- Connaissances approfondies sur des familles de molécules

Sommaire

- **2. Matériels et Méthodes**
  - **Le pilote**
  - **Les capteurs**
- 3. Résultats et Discussion
  - Extraction des composés non-volatiles
- 4. Conclusion et perspectives

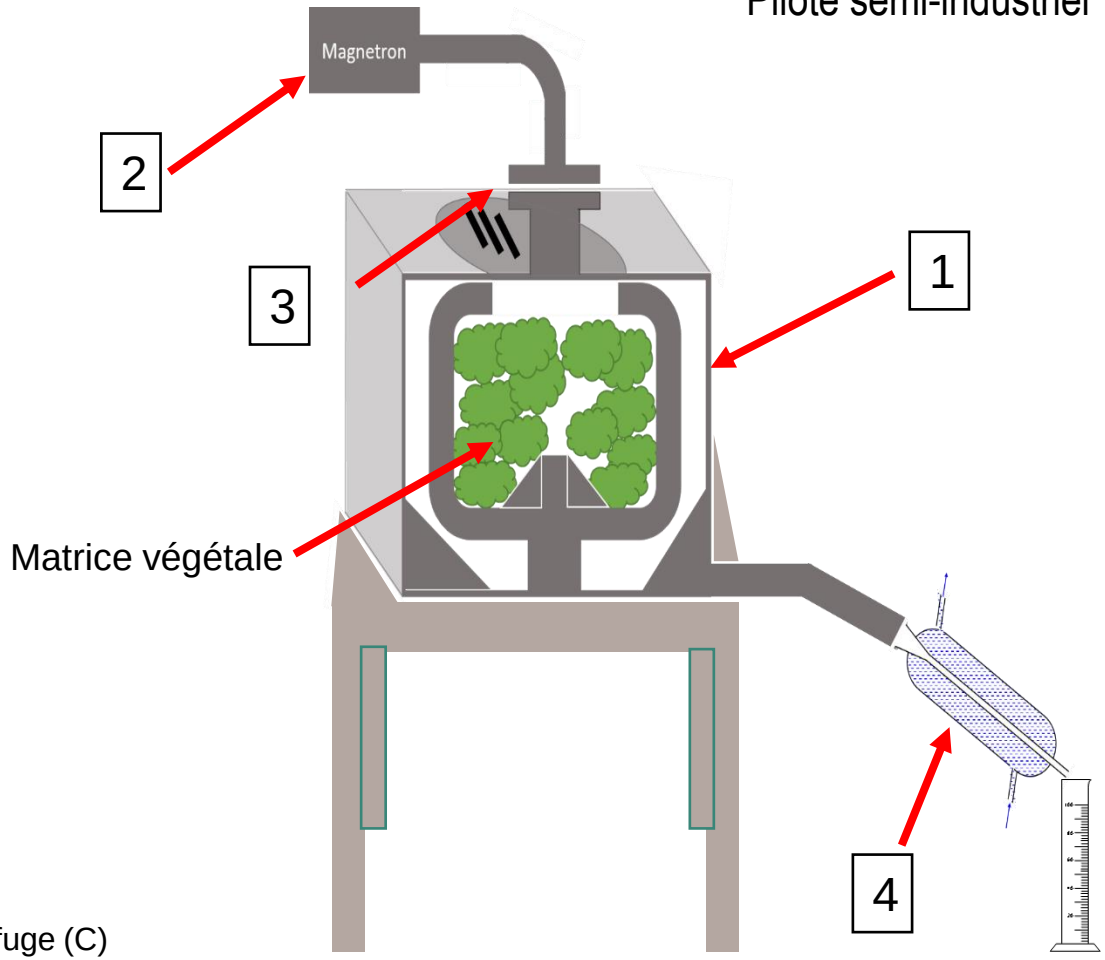
2 - Matériels et Méthodes : Extraction MO/C

- Le pilote



1. Filtration centrifuge (C)
2. Générateur micro-ondes (MO)
3. Guide d'ondes
4. Condenseur

- Pilote semi-industriel



Limitations du pilote :
1200 W et 4000 tr/min (effet G-max 2500)
(Volume du panier ≃7 L)

Instrumentation

L'objectif du pilote est de mesurer tous les paramètres qu'interviennent pendant l'extraction pour :

- Comprendre les phénomènes physiques
- Modéliser le procédé.

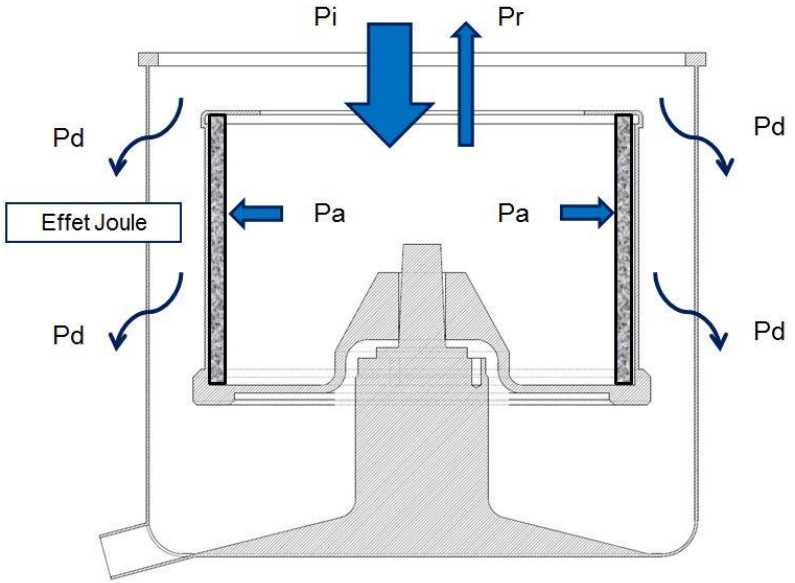
} Combinaison d'un effet mécanique et thermique

Paramètres à mesurer :

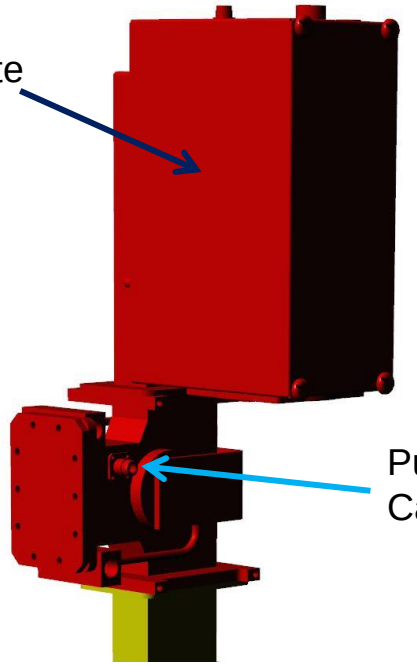
- Vitesse de rotation du panier
  - Force centrifuge mesurée avec un tachymètre
- Puissance micro-ondes
  - Puissance réfléchie & puissance incidente
- Température
  - De surface et de cœur

- Puissance micro-ondes

Le premier objectif est de connaître l'énergie apportée par les micro-ondes au produit (Puissance absorbée).



Puissance incidente
Calcul : $P = I_a \times U_a$

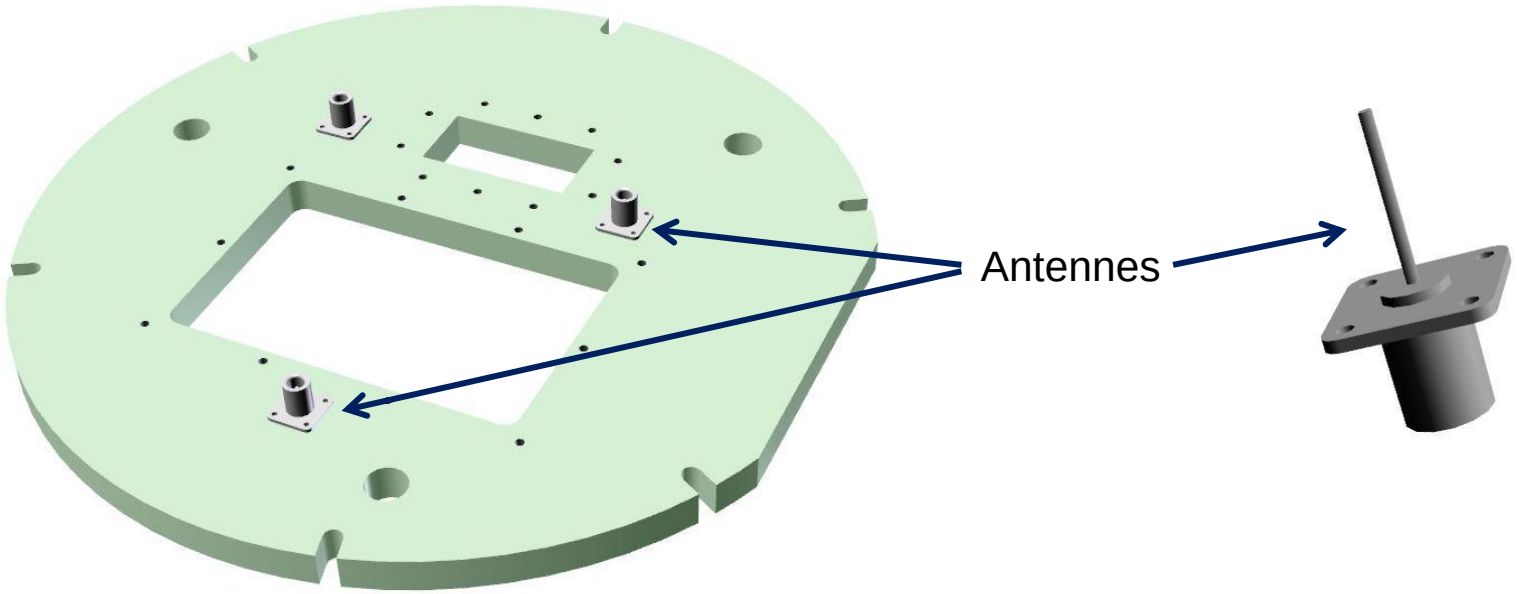


Puissance réfléchie
Capteur de cristal détecteur diode

- Champ électrique

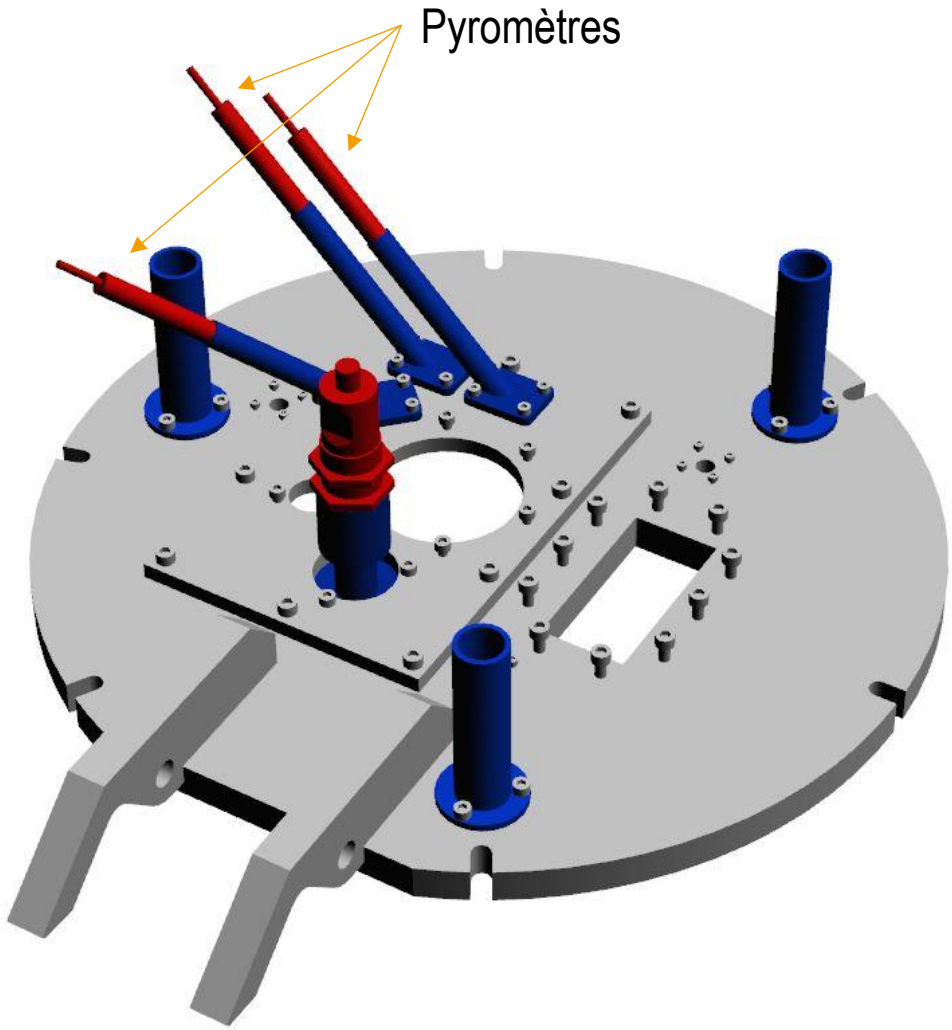
Le deuxième objectif est de connaître le champ électrique.

- Pour modéliser le champ électromagnétique.



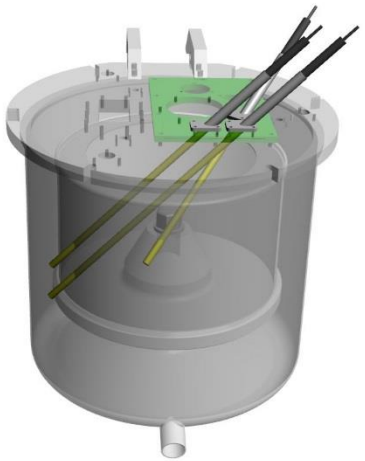
Antennes + Voltmètres → Champ électrique → Champ électromagnétique

- Protection des capteurs (Fort champ électromagnétique)



2 - Matériels et Méthodes : Les capteurs

Température



Troisième objectif est de connaître la température au niveau de :

- La surface de la matrice végétale
  - Pyromètres
- L'intérieur de la matrice végétale
  - Thermo boutons

Consommation énergétique

Pour montrer l'intérêt énergétique du couplage Micro-ondes/centrifuge

Deux compteurs électriques sont implantés :

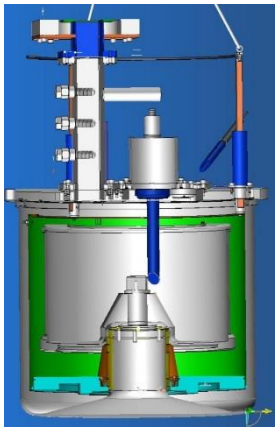
- Filtration centrifuge
- Générateur Micro-ondes

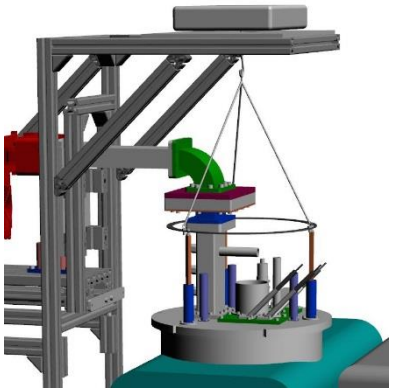
2 - Matériels et Méthodes : les capteurs

- Outils installés non utilisés pour cette étude

Système d'extraction et échangeur de chaleur :

- VMC double flux
- Rendement 92 %
- Débit maximum 120 m3 /h



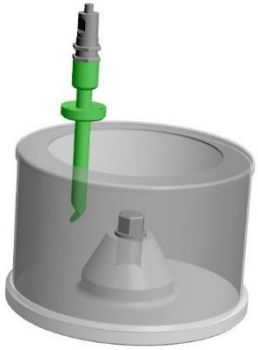


Bilan de masse avec système de double pesée

- Cinétique de formation du gâteau de filtration
- Gain de précision
- Débitmètre + balances

Capteur de distance par ultrasons

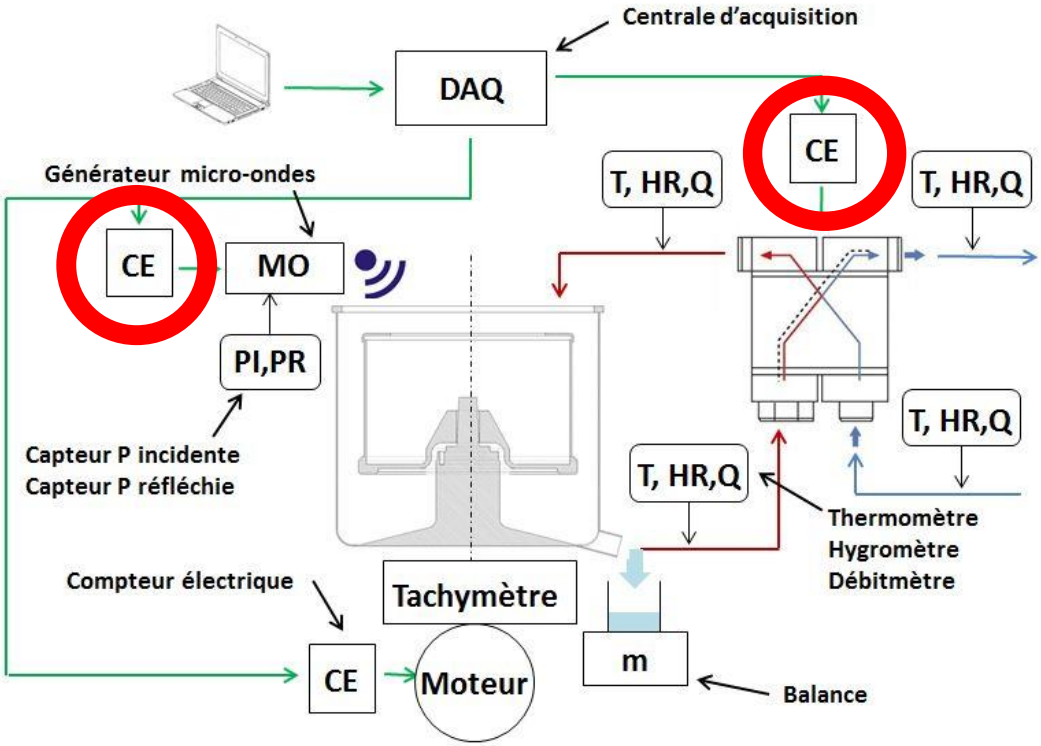
- Position de l'anneau liquide
- Répartition des particules dans le gâteau, planéité
- Force sur le gâteau

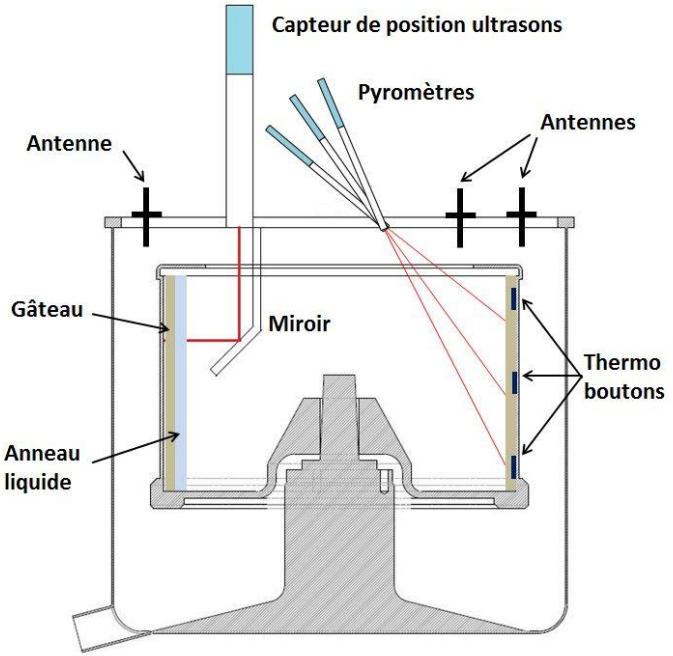


- Acquisition des données

Centrale d'acquisition Compact DAQ National Instrument

Programme de supervision réalisé en Labview





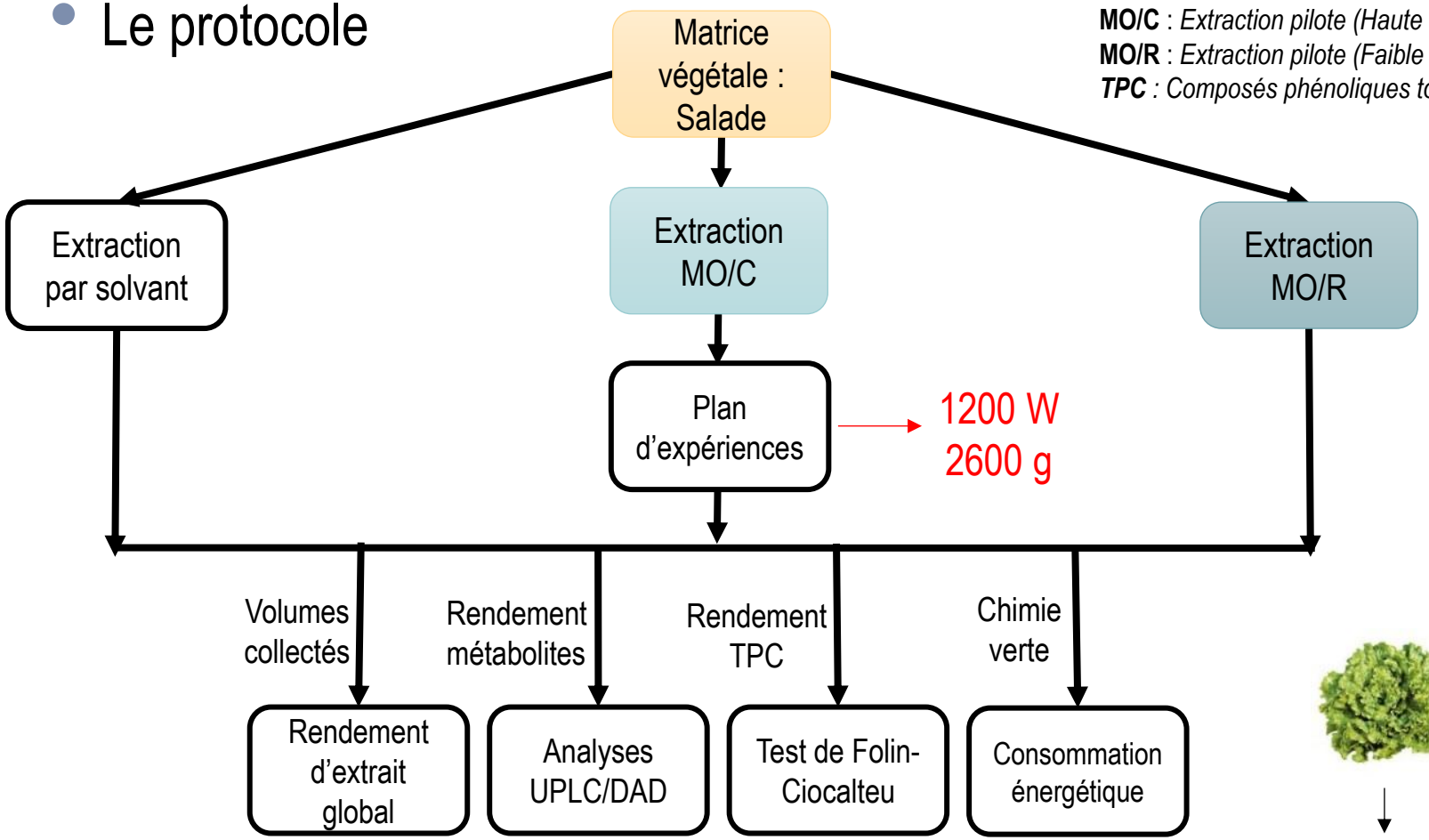
Sommaire

- 2. Matériels et Méthodes
  - Le pilote
  - Les capteurs
  - L'extraction
- **3. Résultats et Discussion**
  - **Extraction des composés non-volatiles**
- 4. Conclusion et perspectives

3 -Résultats et Discussions

- Le protocole

MO/C : *Extraction pilote (Haute vitesse de rotation)*
MO/R : *Extraction pilote (Faible vitesse de rotation)*
TPC *: Composés phénoliques totaux*



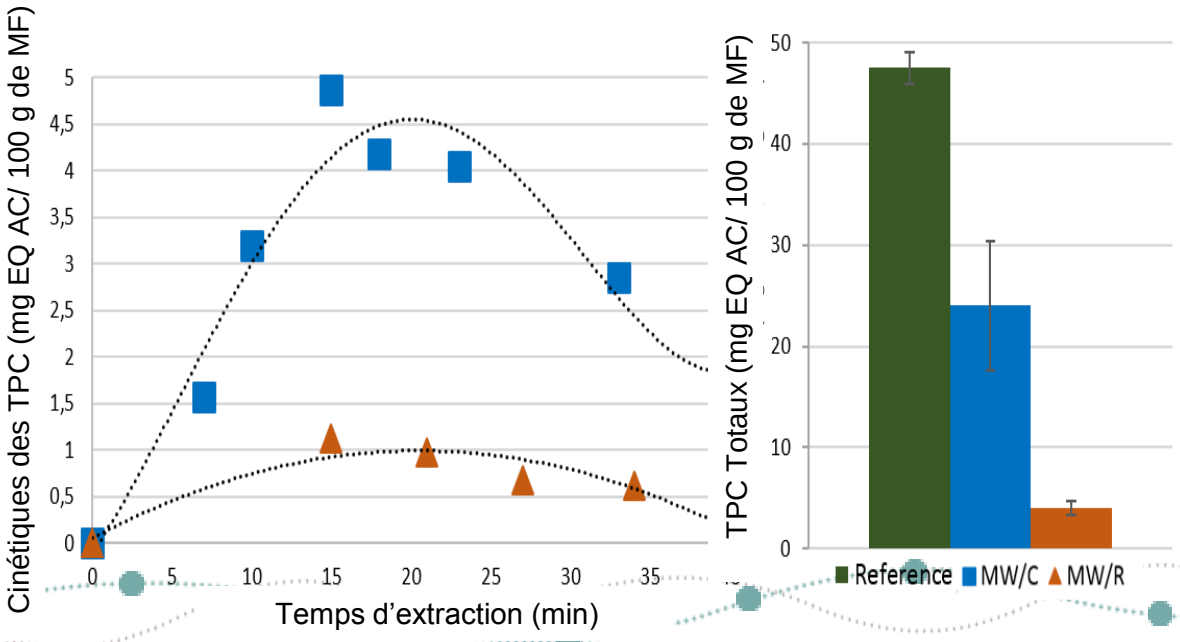
Composés phénoliques

Composés non-volatiles

3 -Résultats et Discussions

Test de Folin-Ciocalteu : Composés Phénoliques Totaux (TPC)

- MO/C : 24mg pour les TPC et MO/R : 4mg
- Un maximum est observé vers 20 min
- La vitesse de rotation a une forte influence pour l'extraction des TPC
- Référence : utilisation de solvant

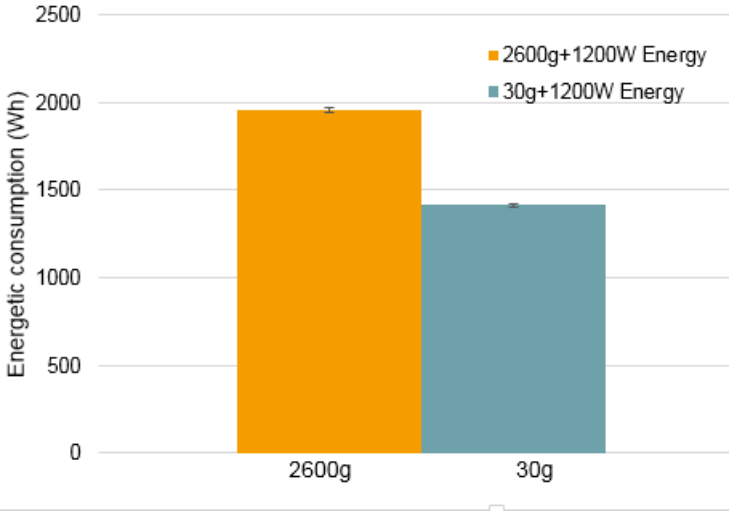


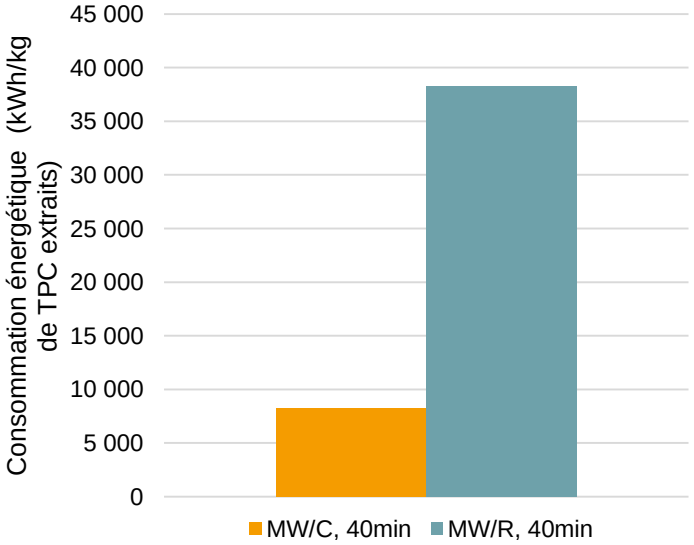
- Consommation énergétique

Pour montrer l'intérêt énergétique du couplage Micro-ondes/centrifuge

Deux compteurs électriques sont implantés :

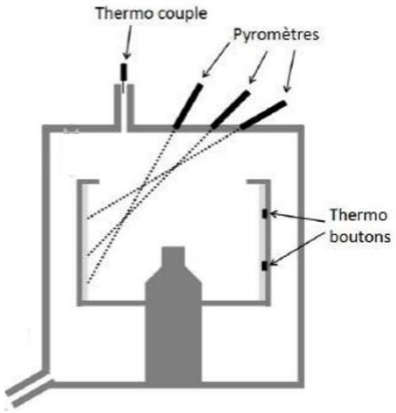
- Filtration centrifuge
- Générateur Micro-ondes





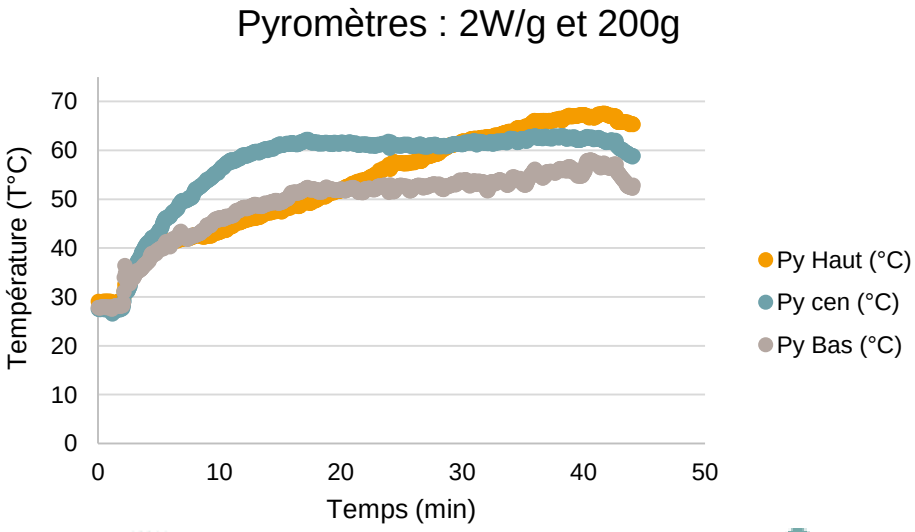
- Température

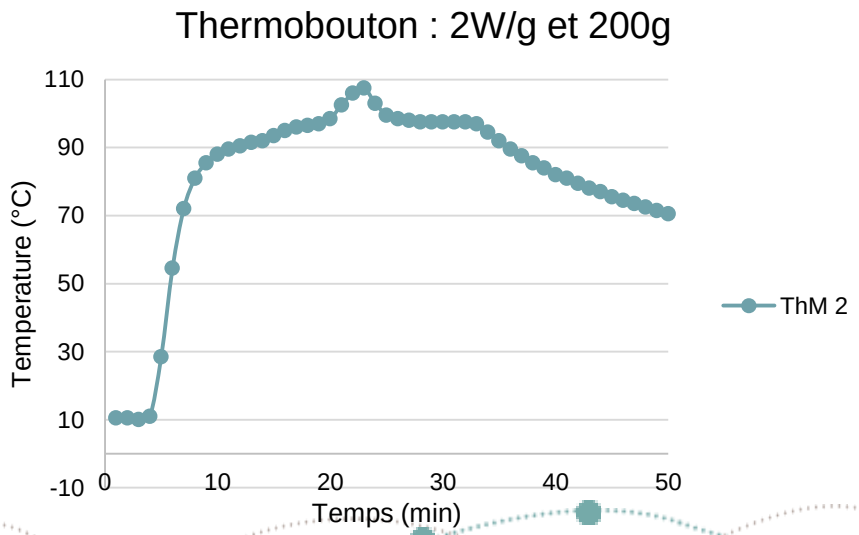
Pour montrer l'intérêt énergétique du couplage Micro-ondes/centrifuge



Mesures températures :

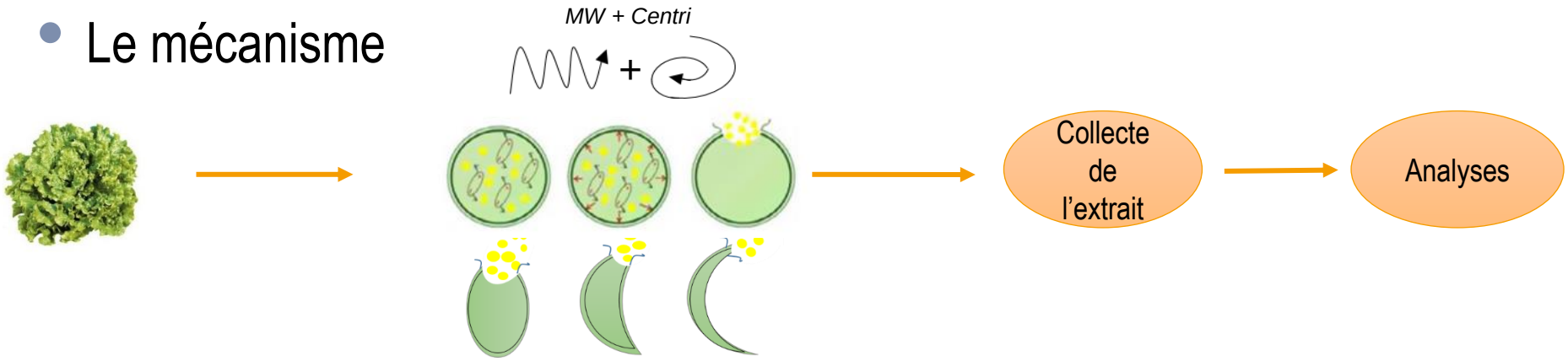
- Cœur de la matrice
- général





3 -Résultats et Discussions

- Le mécanisme



Destruction des cellules sous MO/C

Intérêt démontré pour la salade :

→ Amélioration du rendement d'extraction (comparé à l'extraction micro-onde simple) et consommation d'énergie diminuée

Contribution de la vitesse de rotation :

→ Comprime de la matrice végétale
→ Aide à la destruction des cellules
→ Aide à l'evacuation du liquide
→ Réduit le taux d'humidité de la matice

LWT - Food Science and Technology 98 (2018) 283–290

Contents lists available at ScienceDirect

LWT - Food Science and Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/lwt

Development of microwave-assisted dynamic extraction by combination with centrifugal force for polyphenols extraction from lettuce

Alice Angoy[a,b,c,d], Marc Valat[b], Pascal Ginisty[a], Alain Sommier[b], Pascale Goupy[c], Catherine Caris-Veyrat[c], Farid Chemat[d,*]

[a] IFTS, 3 Rue Marcel Pagnol, 47510, Foulayronnes, France
[b] I2M (CNRS UMR 5295), Université de Bordeaux et Arts et Métiers ParisTech, 33400, Talence, France
[c] INRA, Université d'Avignon, UMR408, Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale, F-84914, Avignon, France
[d] Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, INRA, UMR408, GREEN Extraction Team, F-84000, Avignon, France

Sommaire

- 2. Matériels et Méthodes
  - Le pilote
  - Les capteurs
  - L'extraction
- 3. Résultats et Discussion
  - Extraction des composés non-volatiles
- **4. Conclusion et perspectives**

4- Conclusion

- Le pilote micro-ondes/Centrifugation a été modifié et adapté pour l'extraction
- Couplage pas encore maîtrisé. Compréhension à approfondir

Molécules non-volatiles

- ↗ Puissance micro-ondes + ↗ centrifugation = ↗ Rendement

- La combination de micro-ondes et centrifugation est très complexe

- Pour une meilleure comprehension de la situation : modélisation avec le logiciel Comsol Multiphysics ®

Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives

Merci pour votre attention

Des questions ?

Suivi des propriétés mécaniques d'explants de peau maintenus en survie

Mise en place d'un dispositif de microrhéologie ultrasonore *ex vivo*

Vincent Gauthier, Alice Lemarquand,
Emmanuel Caplain, Jean-Yves Le Huérou, Stéphane Serfaty

Contexte: l'objectivation en cosmétique

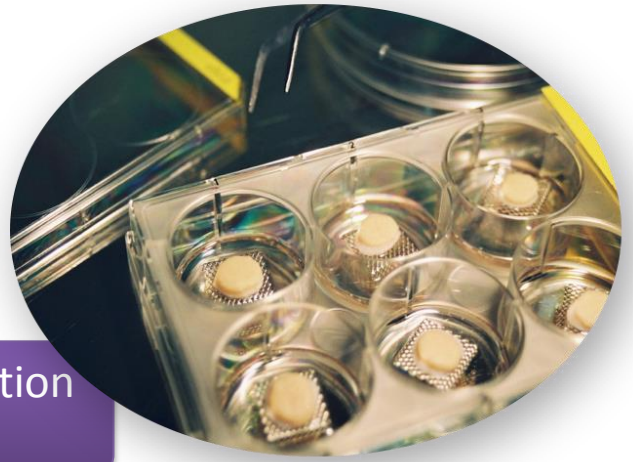
Volonté

- Effet prouvé
- Efficacité majorée
- Bien-être décuplé

Réglementation

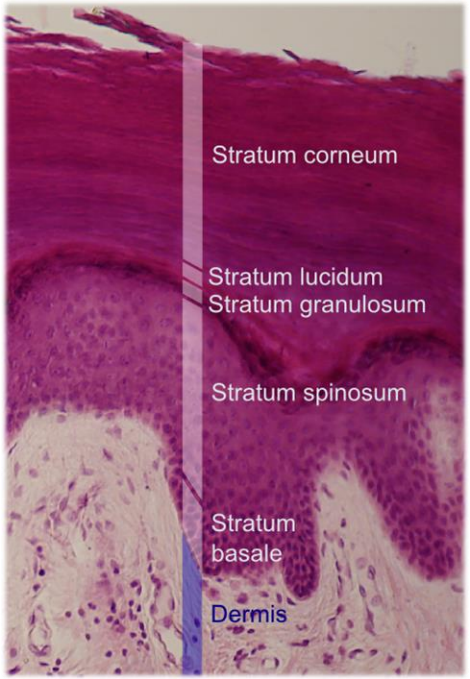
- REACH (2012)
- Exp' animale (2013)
- *In vivo*

Comment objectiver ?



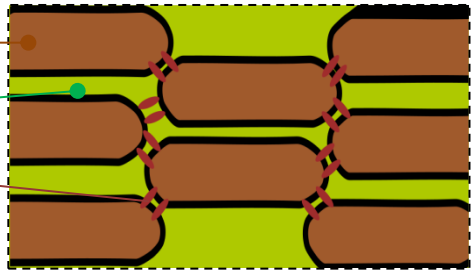
Outils de caractérisation et de prédiction en amont de la conception

La peau, un multicouche viscoélastique



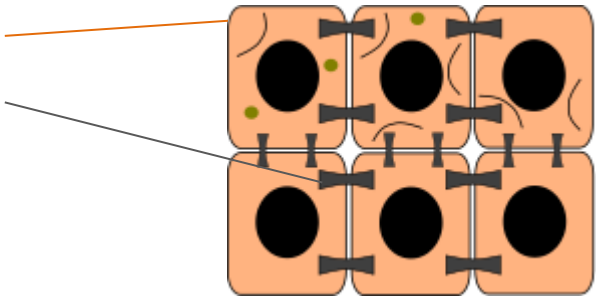
Stratum corneum:
- Cornéocytes
- Plongés dans un ciment lipidique
- Liées par cornéodesmosomes

➔ Matrice majoritairement élastique



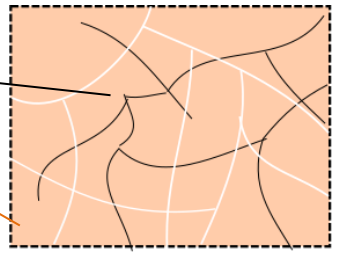
Épiderme:
- Kératinocytes
- Liées par desmosomes

➔ Cellules viscoelastiques liées les unes aux autres

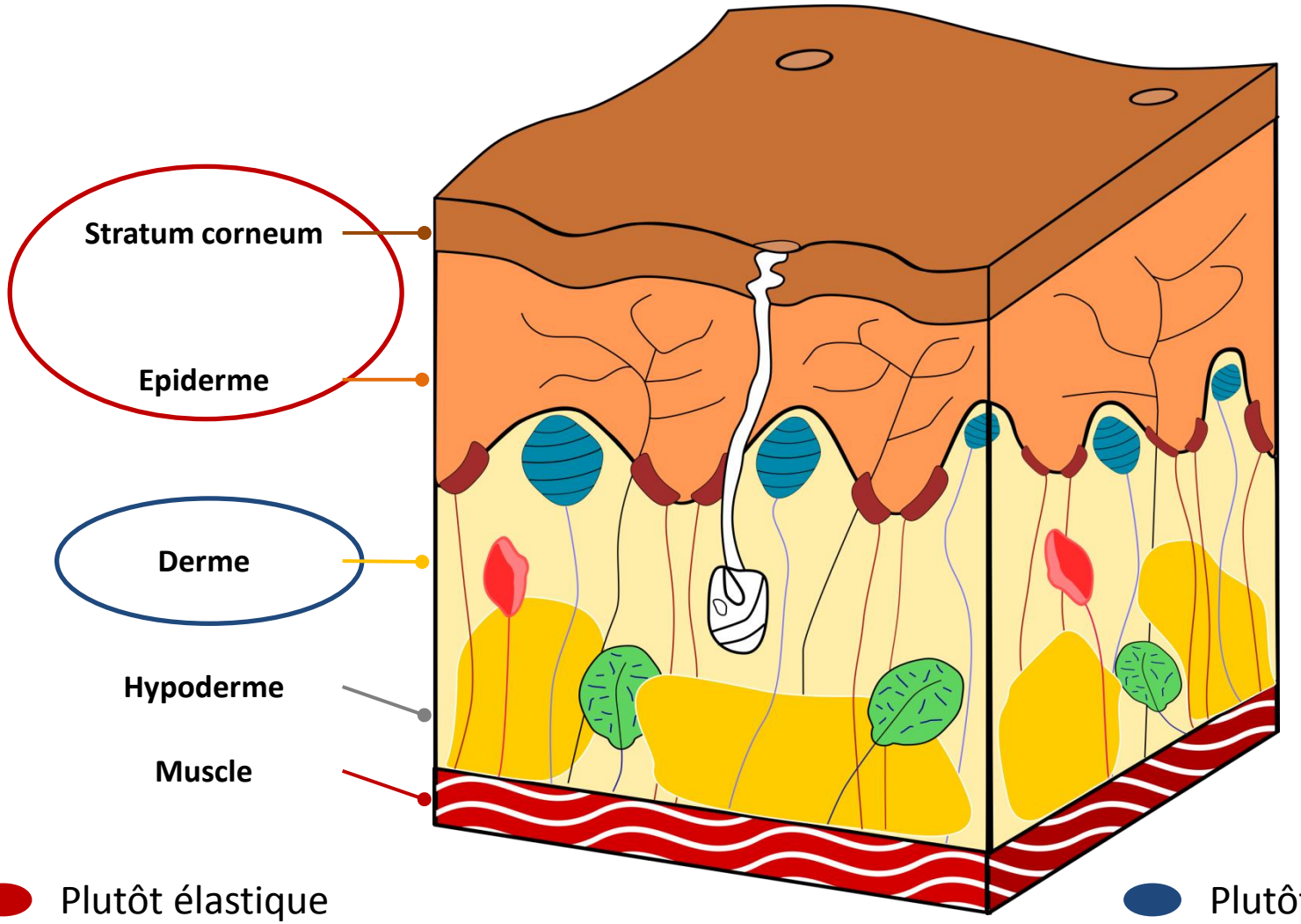


Derme:
- Réseau élastine + collagène
- « Substance fondamentale »

➔ Fibres plongées dans un gel



La peau, un multicouche viscoélastique



Plutôt élastique

Plutôt visqueux

Modélisation des fluides complexes

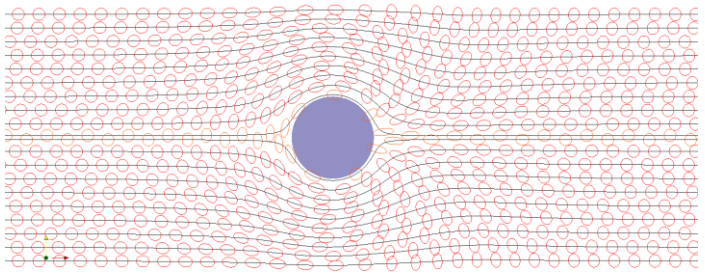
- Mouvement de cisaillement
  - Glissement des couches du fluide
  - Vitesse et contrainte de cisaillement

$$\dot{\gamma}\ [s^{-1}]; \quad \sigma\ [Pa]$$

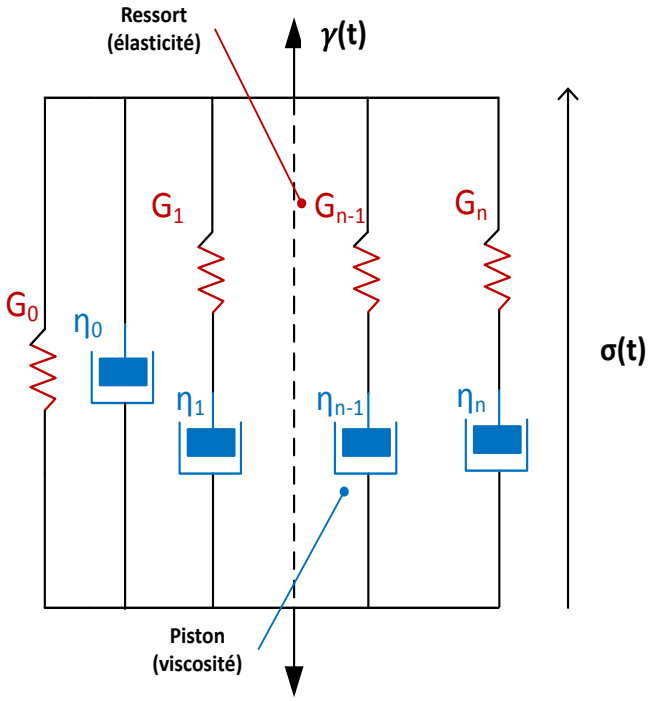
- Modélisations rhéologiques habituelles
  - Solide: Loi de Hooke (ressort = élasticité)
  - Fluide: Loi de Newton (piston = viscosité)
  - **Fluide viscoélastique**:

$$\sum_m A_m \frac{\partial^m \sigma(t)}{\partial t^m} = \sum_n B_n \frac{\partial^n \gamma(t)}{\partial t^n}$$

$$g(t) = \sum_i G_i \exp(-\frac{t}{\tau_i}) \qquad \tau_i = \frac{\eta_i}{G_i}$$



Modèle de Maxwell généralisé



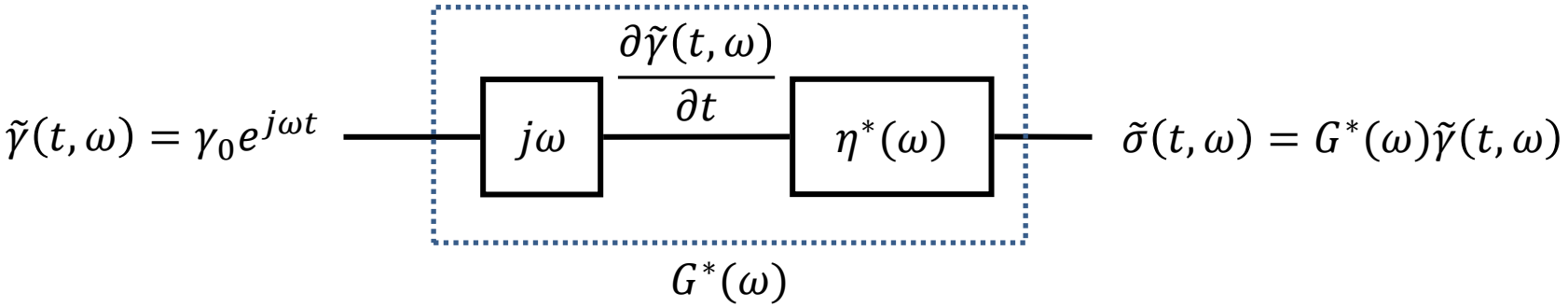
Étude dans le domaine fréquentiel

Loi de comportement du fluide complexe

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^{t} \frac{\partial \gamma(t)}{\partial t} g(t-t')dt' = g(t) * \frac{\partial \gamma(t)}{\partial t}$$

Comportement du fluide complexe en régime harmonique

(changer de fréquence, c'est changer d'échelle)



Définition du module complexe de cisaillement

$$G^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} e^{j\delta} = G'(\omega) + i\, G''(\omega)$$

Module élastique (conservation d'énergie)

Module visqueux (pertes d'énergie)

Réponse aux temps courts

- Cas d'un fluide parfait:
  - $G''(\omega) \propto j\omega$
- Cas d'un polymère
  - Modèles de Rouse et Zimm à HF
  - $G''(\omega) \propto (j\omega)^{\alpha}$
  - $\alpha = 0{,}5 - 0{,}67$
- Introduction des dérivées fractionnaires
  - **Nouvel élément rhéologique**

$$\sigma(t) = g(t) D_C^{\alpha} \gamma(t)$$

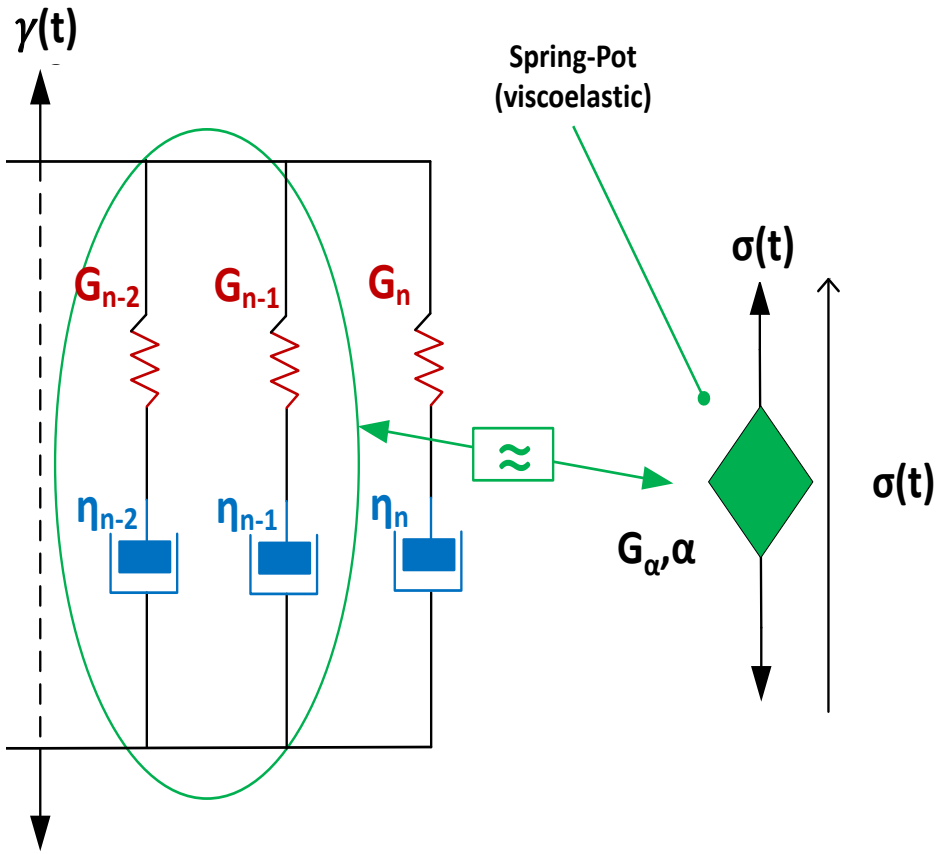
  - Réponse harmonique

$$\sigma(\omega) = \eta(\omega)\,(j\omega)^{\alpha}\gamma(\omega)$$

$$\alpha \in]0;1[$$

  - Coefficient de structure et viscosité apparente

$$G(\omega) = \eta(\omega)\,(j\omega)^{\alpha}$$



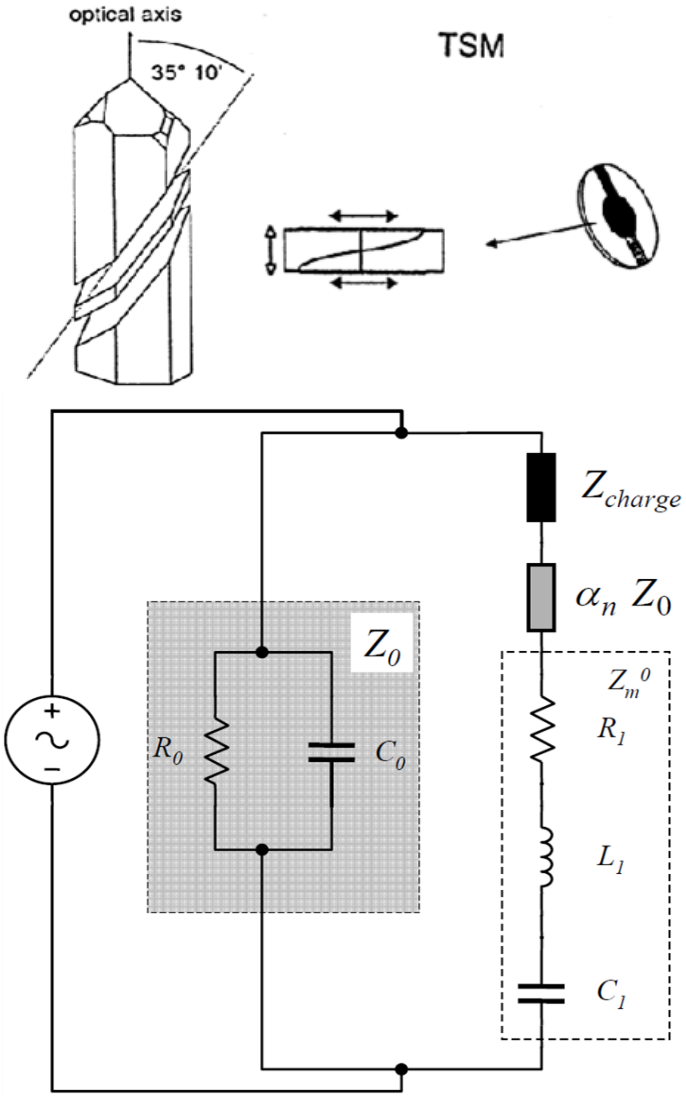
Extraction de G* par impédancemétrie

- Quartz de coupe AT (Thickness shear mode)
  - Ondes de volume de cisaillement
  - Petites déformations
  - Non destructif
- Modèle Butterworth-Van Dyke (modifié)
  - Valable aux résonances
  - Z_{quartz} donne accès à G^*

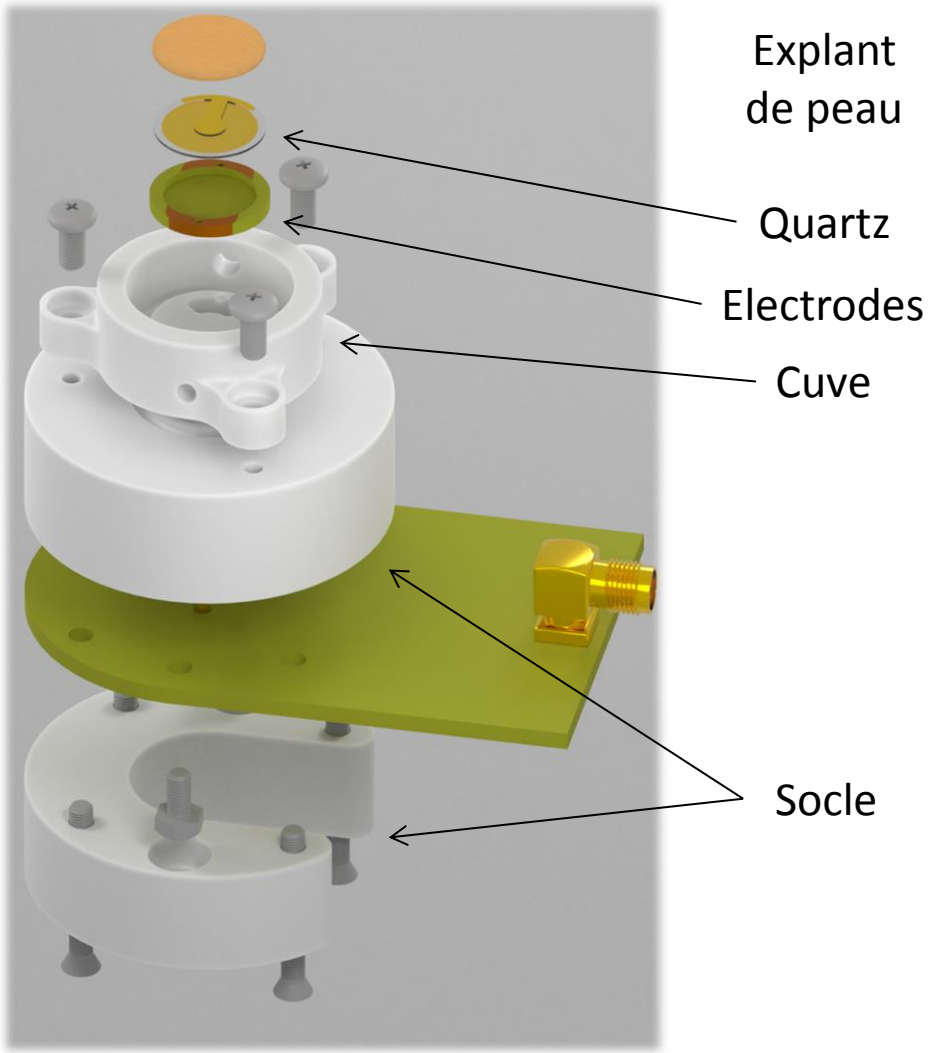
➔ Possibilité de remonter à G* par mesure de Z

➔ Valable pour une propagation semi-infinie

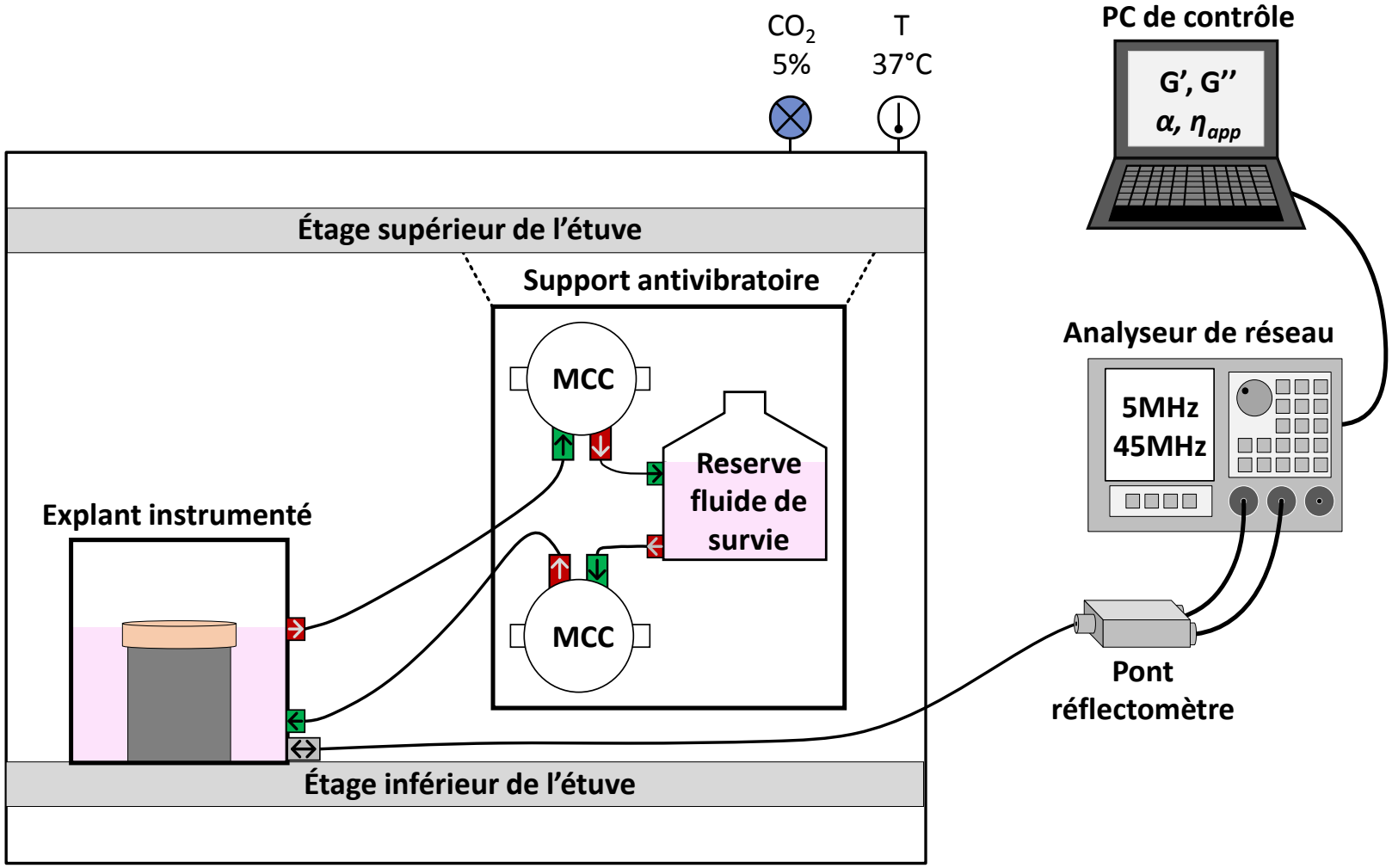
$$Z_{charge} \sim \sqrt{\left(\frac{\left(|G^*(\omega)| + G'(\omega)\right)}{2\rho_{materiau}}\right)} + j\sqrt{\left(\frac{\left(|G^*(\omega)| - G''(\omega)\right)}{2\rho_{materiau}} + \omega h_{eff}\right)}$$



Cellule de mesure pour explant



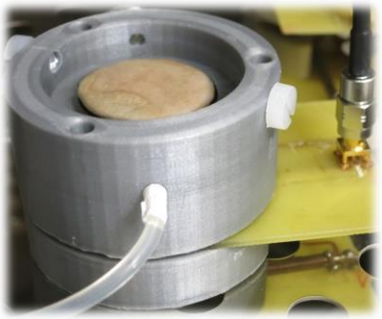
Chaîne de mesure *ex vivo*

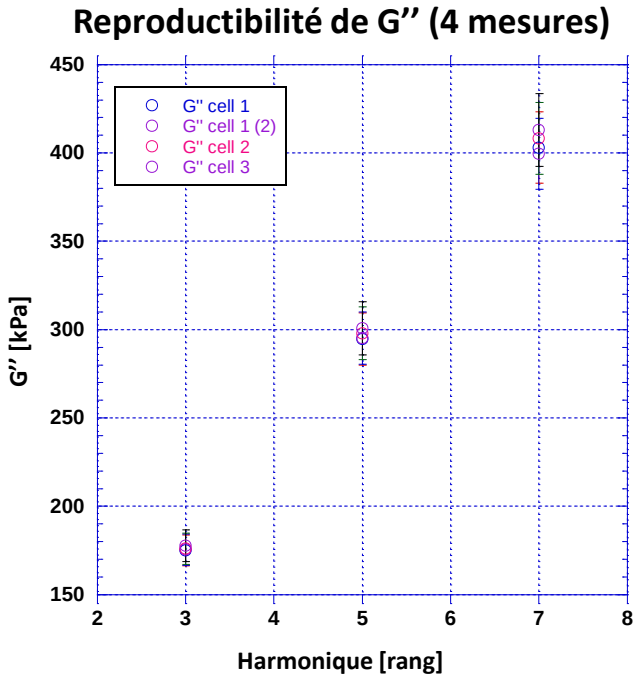


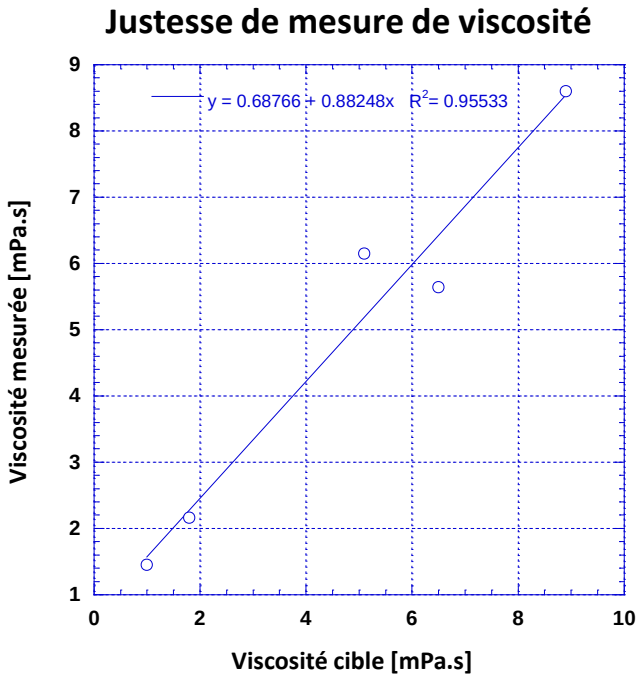
Validation par gamme de glycérol

- Reproductibilité sur 1 même cellule
- Reproductibilité sur 3 cellules différentes

➔ Mesure de la viscosité de 4 mélanges glycérol/eau

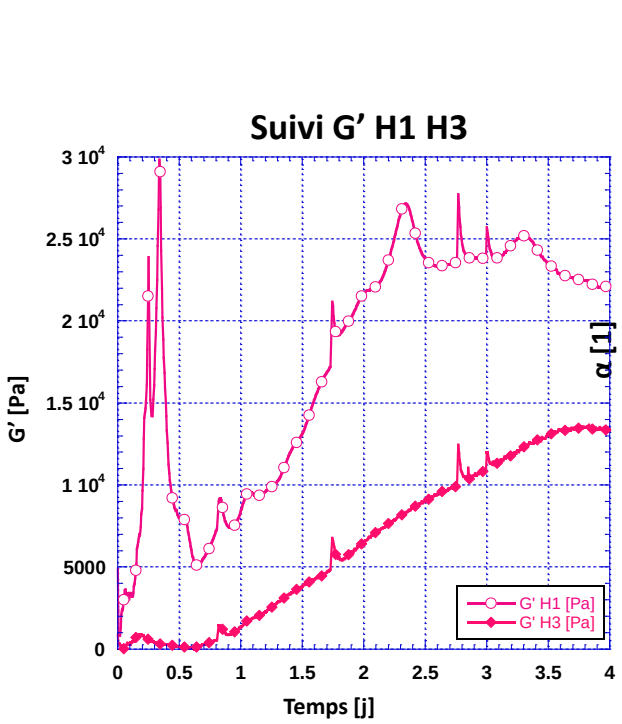


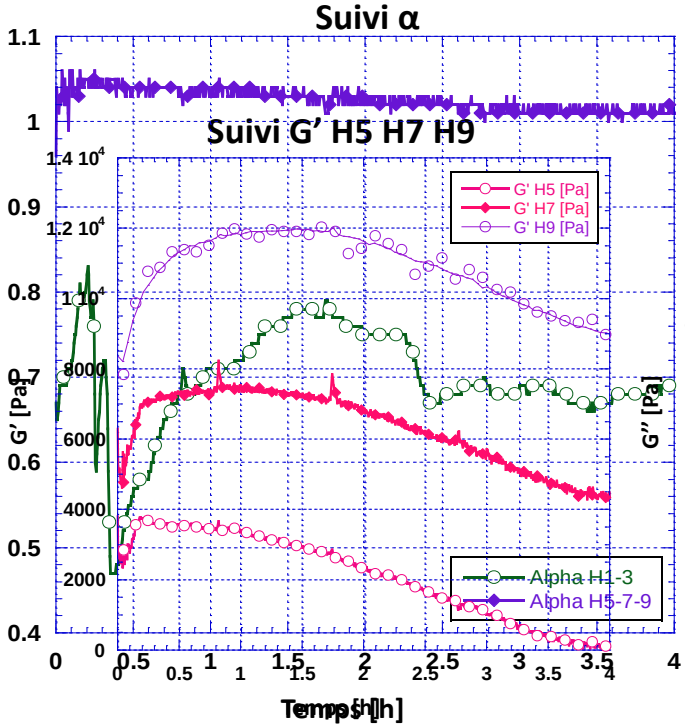


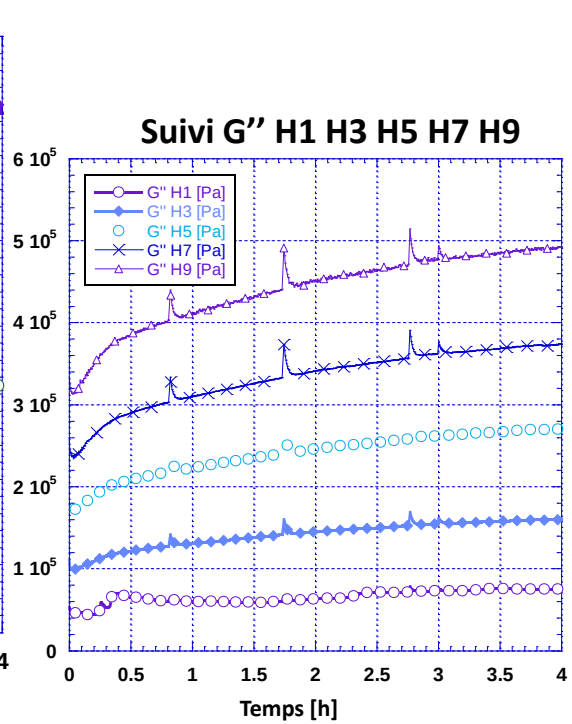


Comportement en fréquence

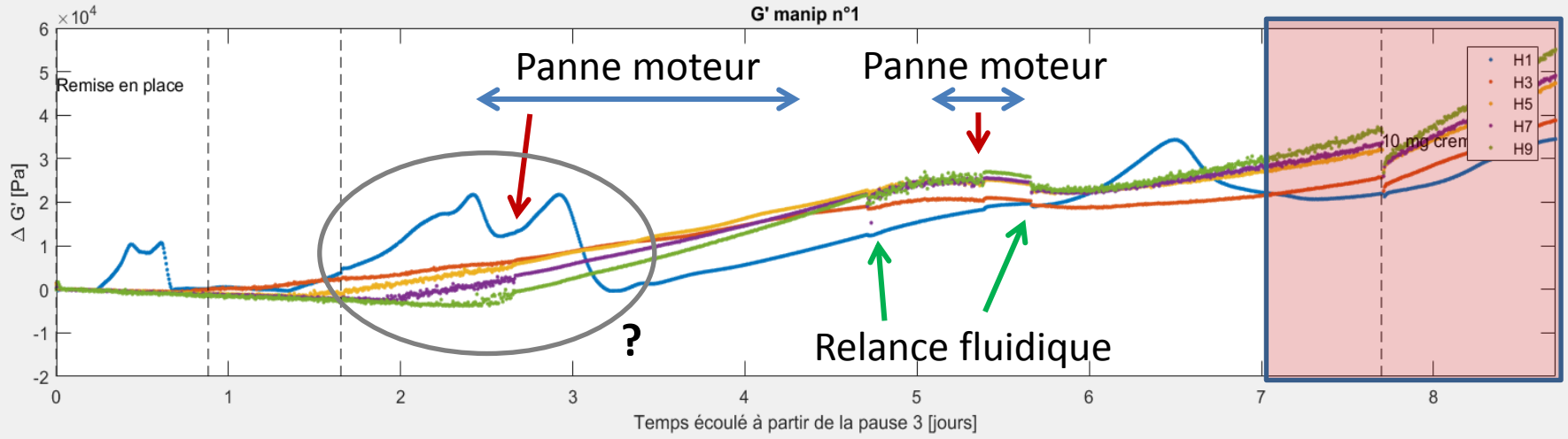
- Explant de peau décongelée
- Tampon physiologique (PBS) comme fluide de survie
- Cinétique de déshydratation
- Différenciation H1 H3 Vs. H5 H7 H9

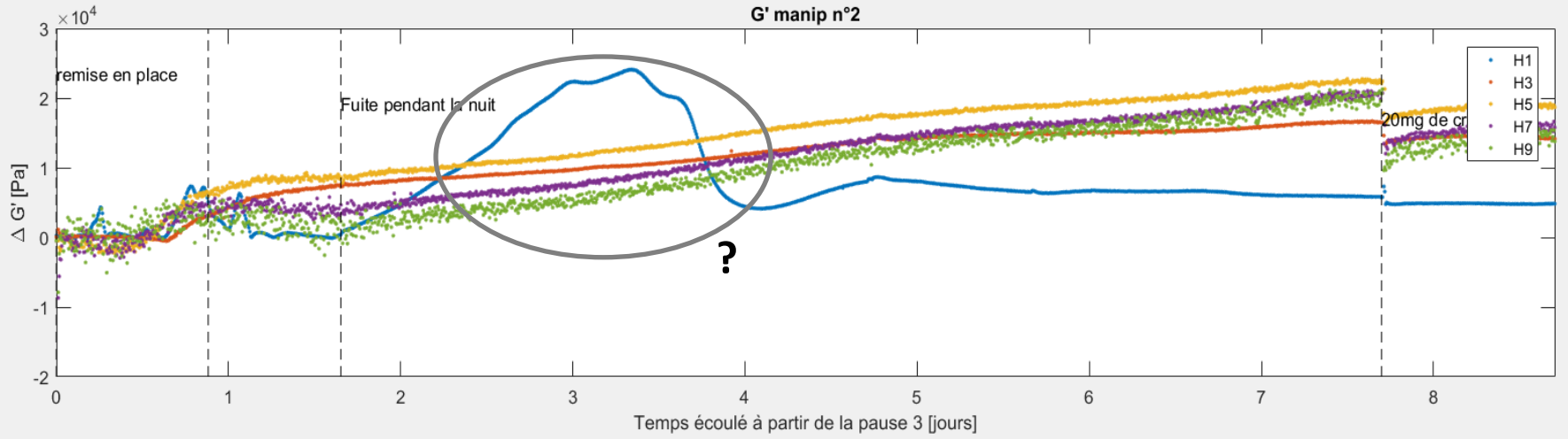




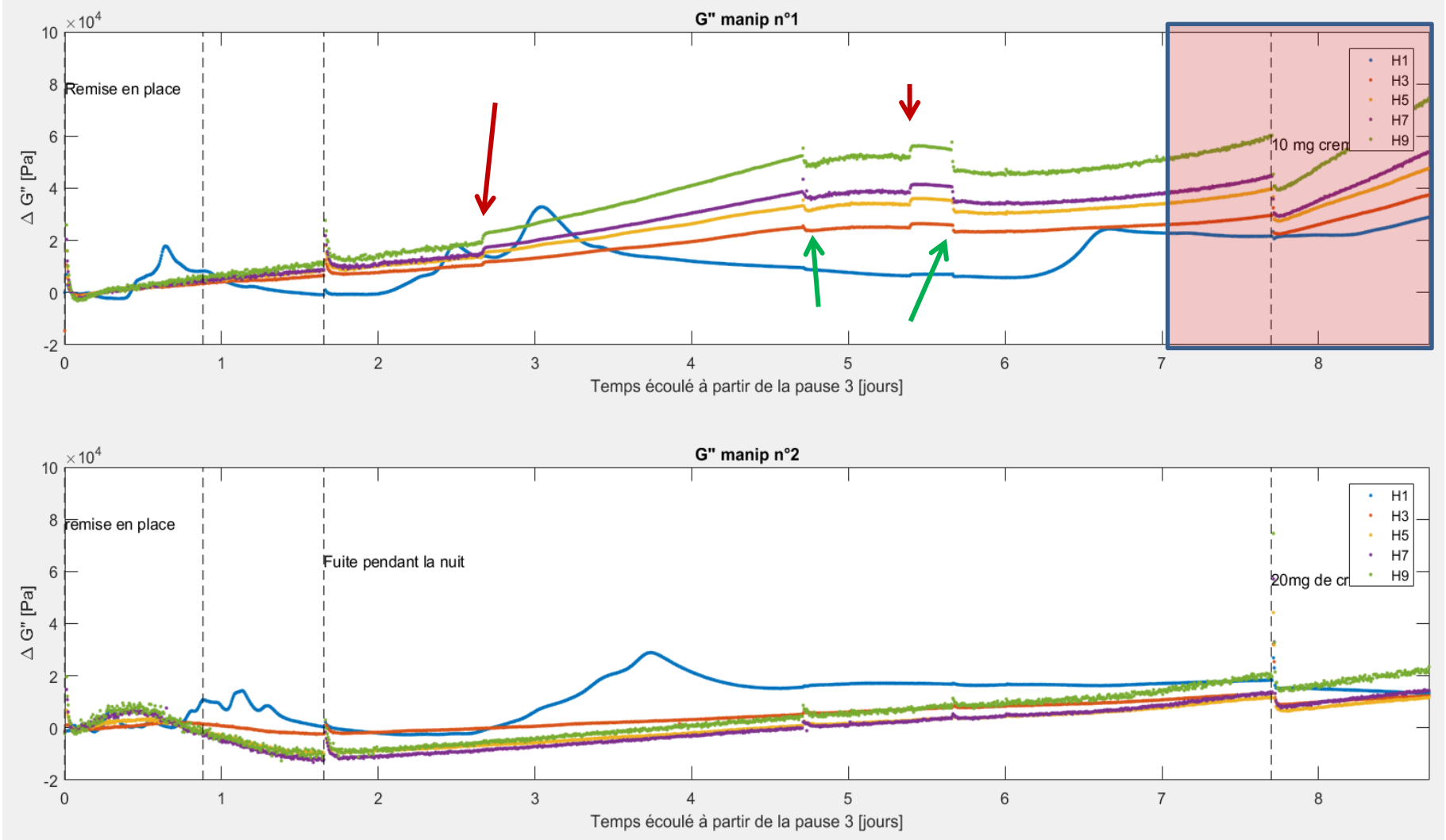


Suivi d'explants en survie

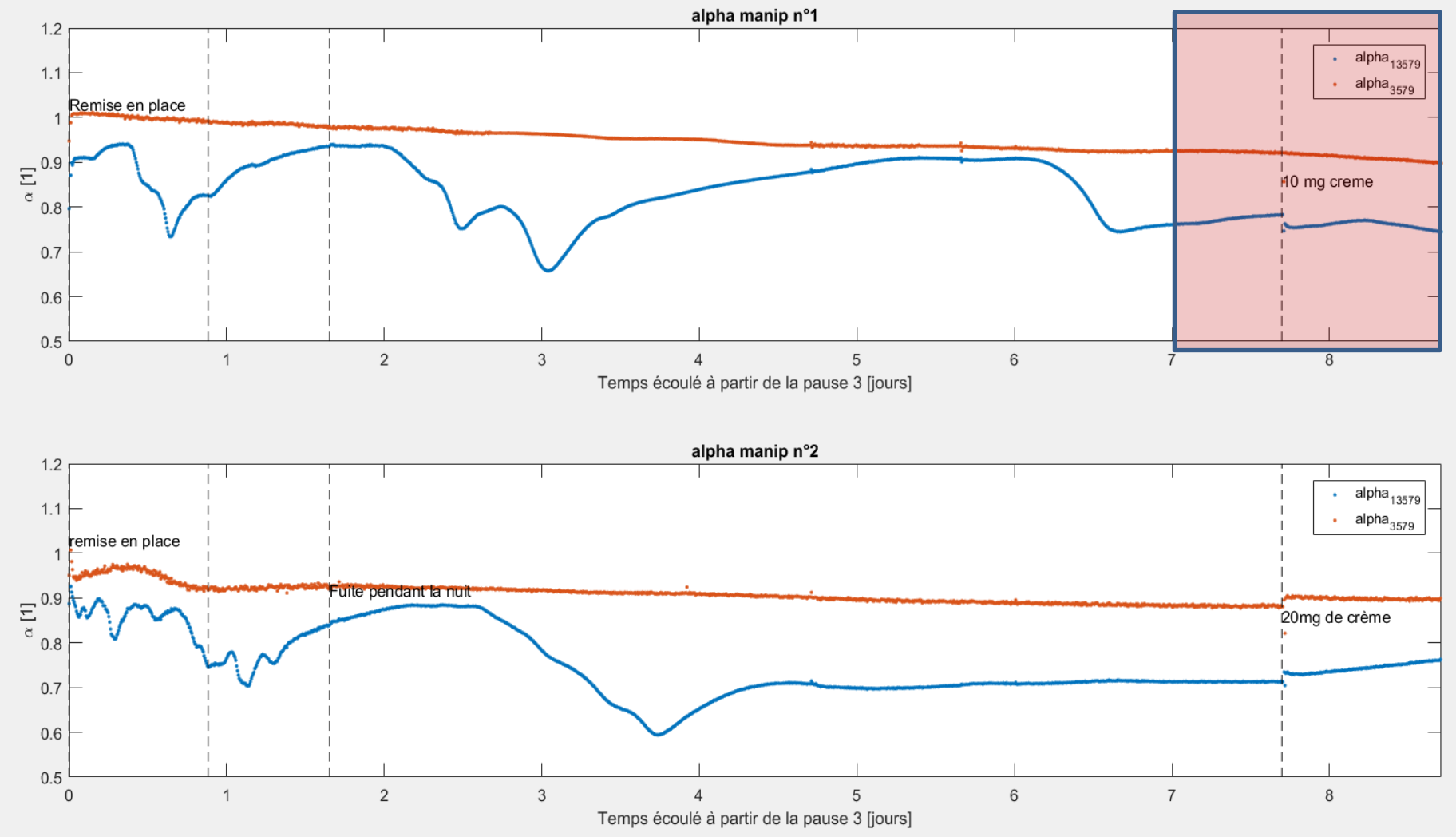




Suivi d'explants en survie



Suivi d'explants en survie



Conclusion et perspectives

- Modélisation de la peau comme viscoélastique multicouche
- Capacité de la µrhéologie à suivre les propriétés *ex vivo*
- Pertinence de la gamme fréquentielle utilisée

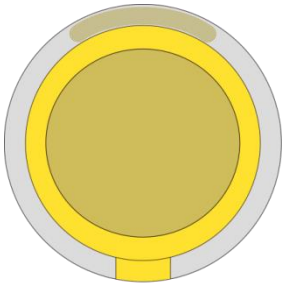
- Limites du modèle semi-infini

➔ Passage à un bicouche à une seule réflexion

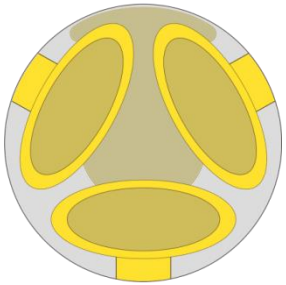
- Problème d'apport en fluide sous l'explant

➔ Fonctionnalisation des électrodes du TSM

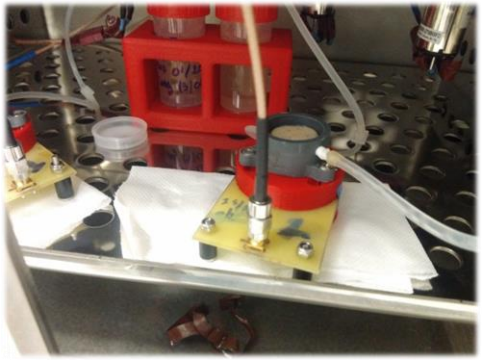
- Nécessité de corréler aux mesures histologiques



TSM Actuel



TSM multi électrodes



marion.breniaux@u-bordeaux.fr

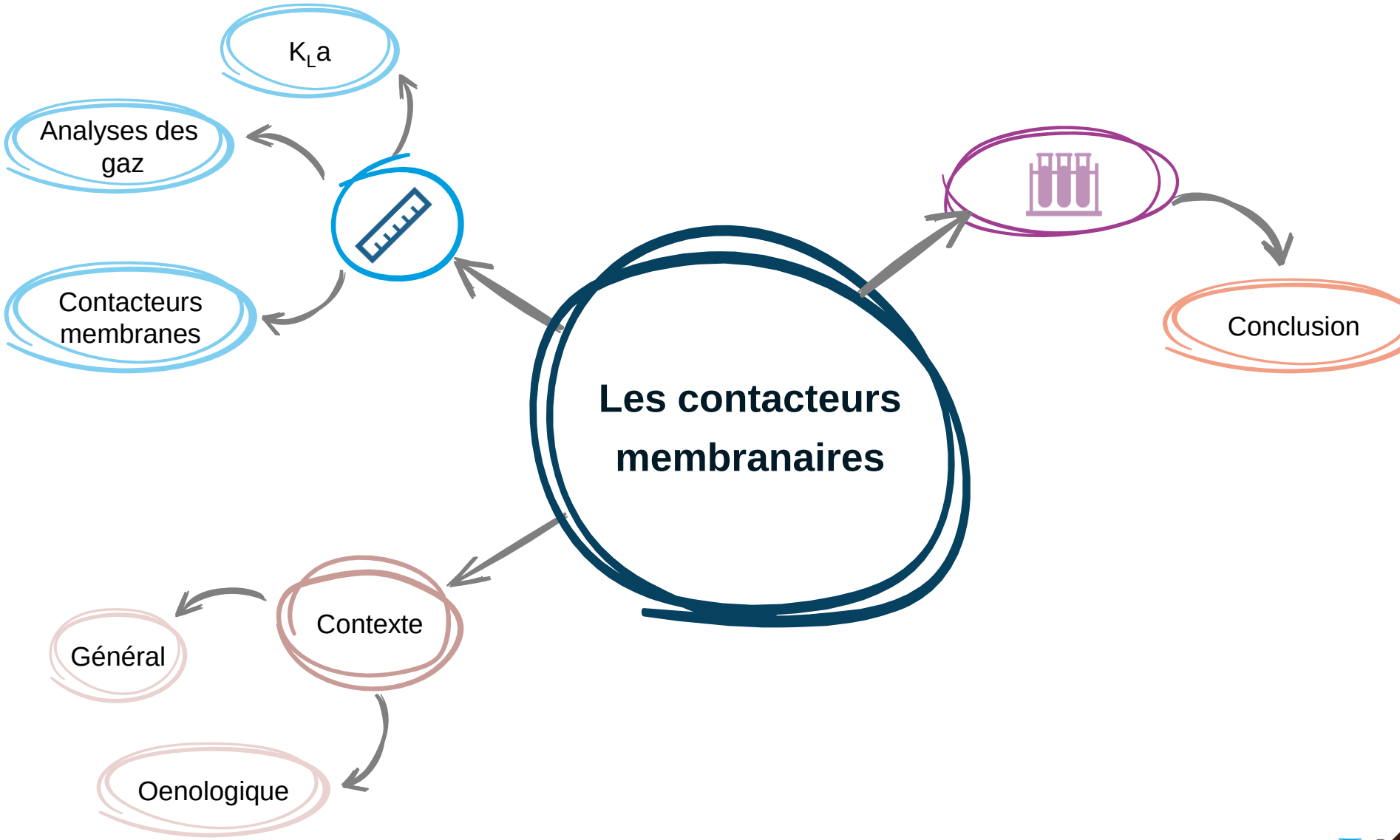
Méthode pour la caractérisation des capacités de transferts des contacteurs membranaires adaptée à l'œnologie

Marion Breniaux, Liming Zeng, Rémy Ghidossi

Univ. Bordeaux, ISVV, Unité Œnologie, EA 4577,
USC 1366 INRA, F-33140, Villenave d'Ornon,
France

université de BORDEAUX / ISVV INSTITUT DES SCIENCES DE LA VIGNE ET DU VIN BORDEAUX AQUITAINE / Unité de Recherche d'Oenologie

Sommaire


K_La
Analyses des gaz
Contacteurs membranes
Les contacteurs membranaires
Conclusion
Contexte
Général
Oenologique

- Qu'est ce qu'un **contacteur membranaire (CM)** ?

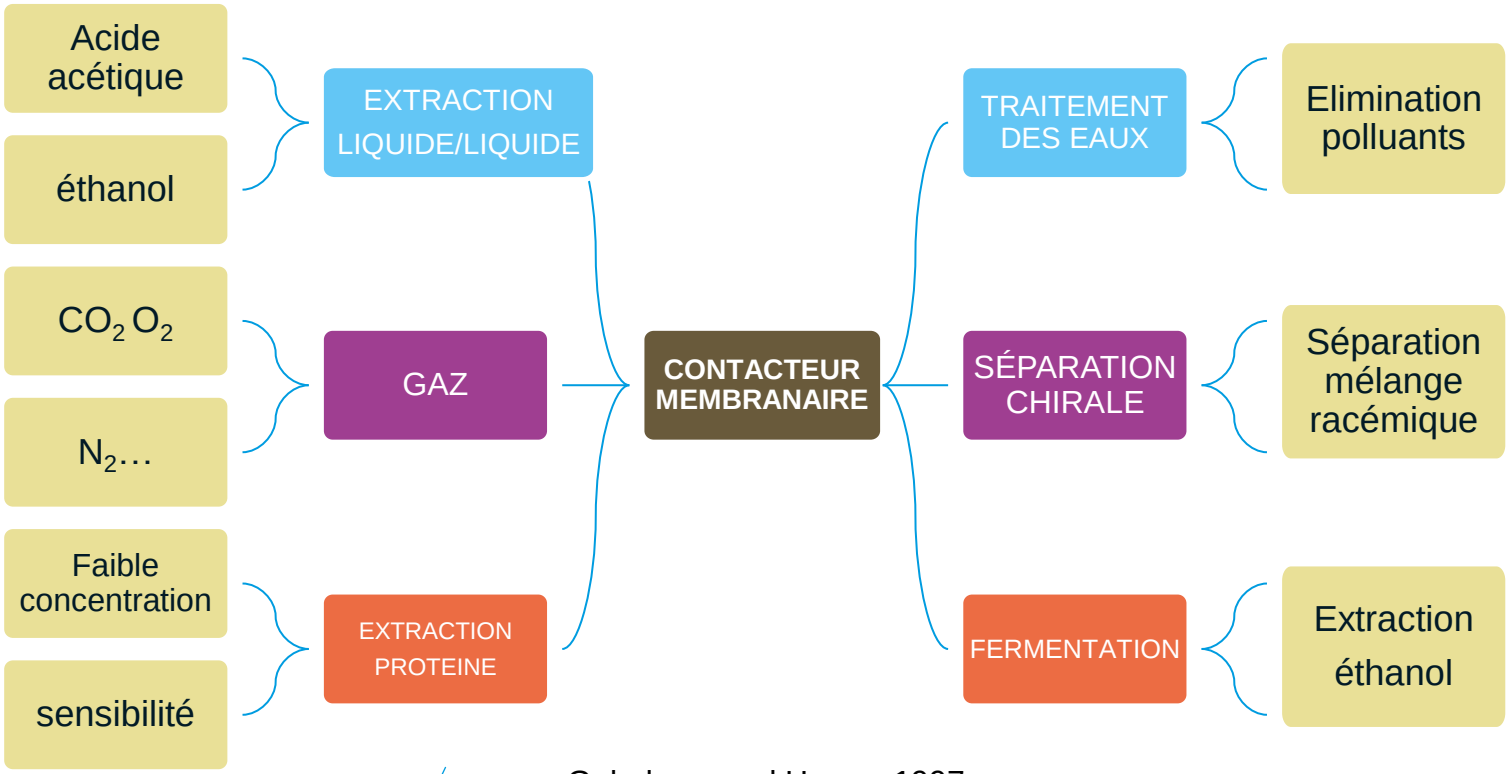
- Membranes en fibres creuses:
  - Polypropylène (PP), Polytetrafluoroethylene (PTFE)…
  - Hydrophobe, hydrophile

- Utilisation large dans différentes industries
  - Liquide/liquide
  - Liquide/gaz

- Qu'est ce qu'un **contacteur membranaire (CM)** ?

- Membranes en fibres creuses:
  - Polypropylène (PP), Polytetrafluoroethylene (PTFE).
  - Hydrophobe, hydrophile

- Utilisation large dans différentes industries



Gabelman and Hwang 1997

Contexte

- Qu'est ce qu'un **contacteur membranaire (CM)** ?

- Membranes en fibres creuses:
  - Polypropylène (PP), Polytetrafluoroethylene (PTFE)...
  - Hydrophobe, hydrophile

- Utilisation large dans différentes industries
  - Liquide/liquide
  - Liquide/gaz

- Œnologie
  - Désalcoolisation — Diban *et al.* 2008
  - Carbonatation — Schonenberger *et al.* 2014
  - Désoxygénation

- Pourquoi manager l'oxygène dans le vin?

Marais & Pool, 1980

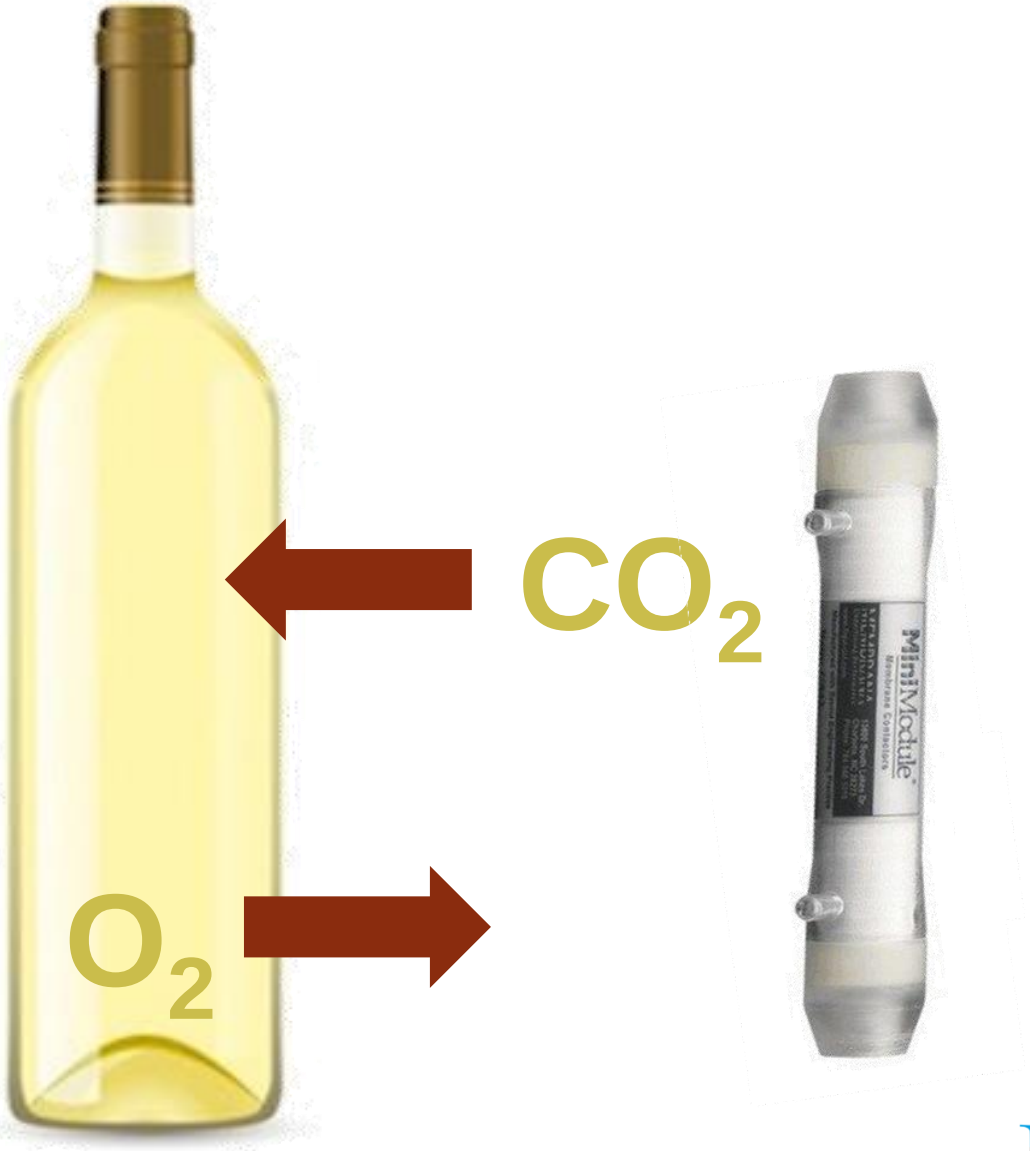
Pons *et al.* 2008
Pons *et al.* 2010

- Pourquoi manager l'oxygène dans le vin?

Certaines pratiques œnologiques peuvent apporter des excès d'O_2 dans le vin

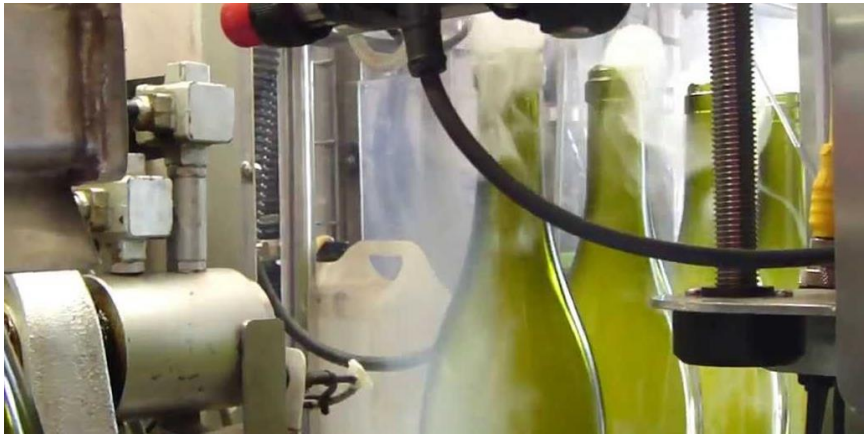
Par l'utilisation de CM:

- Retrait de l'O_2
- Apport en CO_2



- Pourquoi manager l'oxygène dans le vin?

Gestion de la concentration en O_2 et CO_2 avant la mise en bouteille à l'aide des contacteurs membranaires

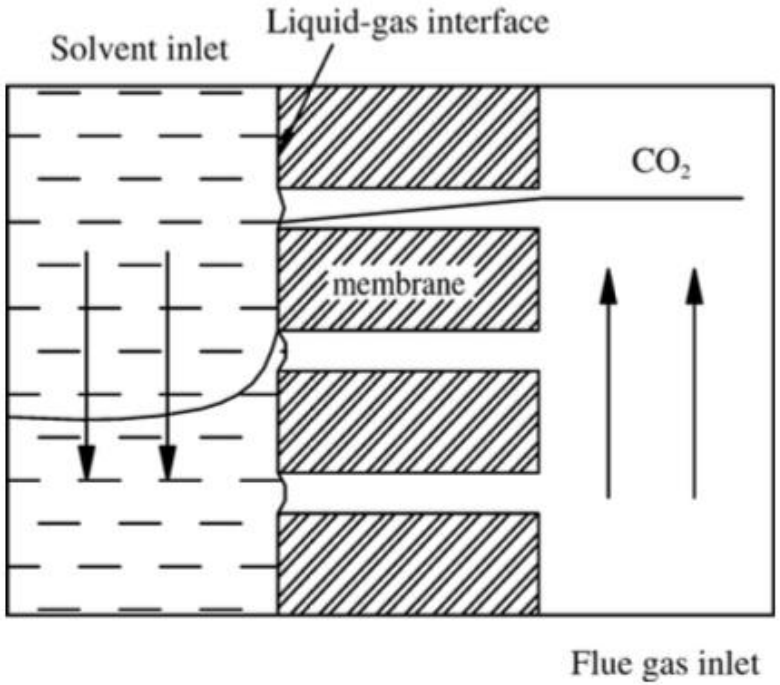


Développement d'une méthodologie pour comparer les différents types de membranes

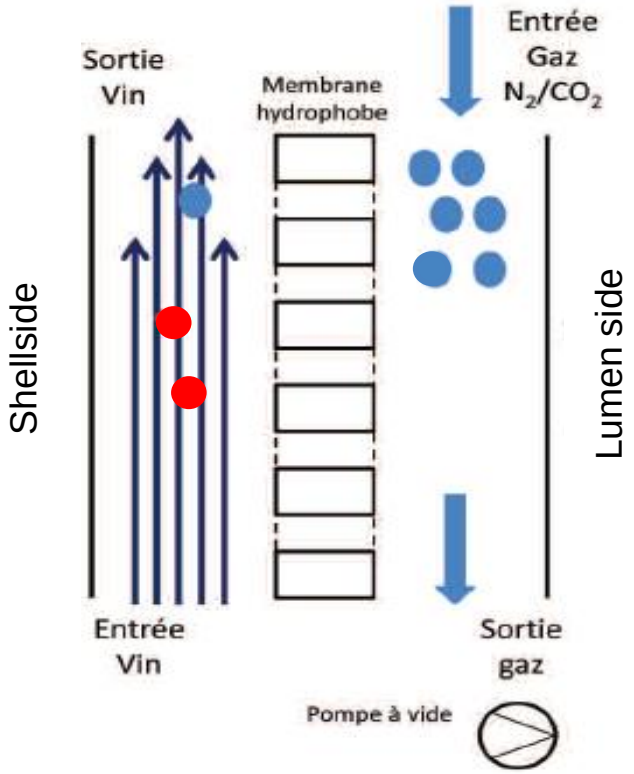
Caractérisation des propriétés initiales des CM

Etude de colmatage et de la mouillabilité

- Fonctionnement du contacteur membranaire
  - Circulation à contre courant
  - Circulation du liquide à l'extérieur des fibres
  - Circulation du gaz à l'intérieur des fibres
  - Mode « non mouillé »

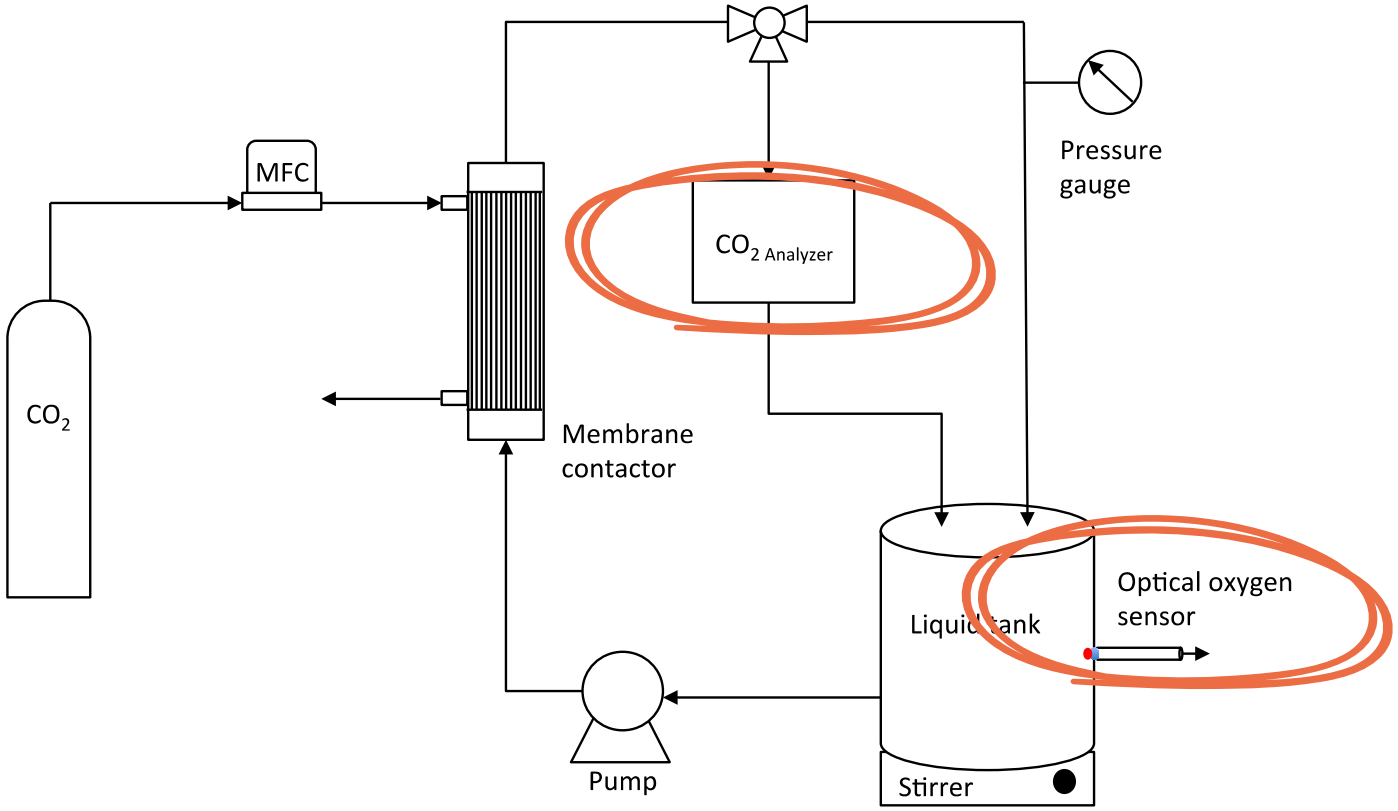


Yan *et al.* 2007

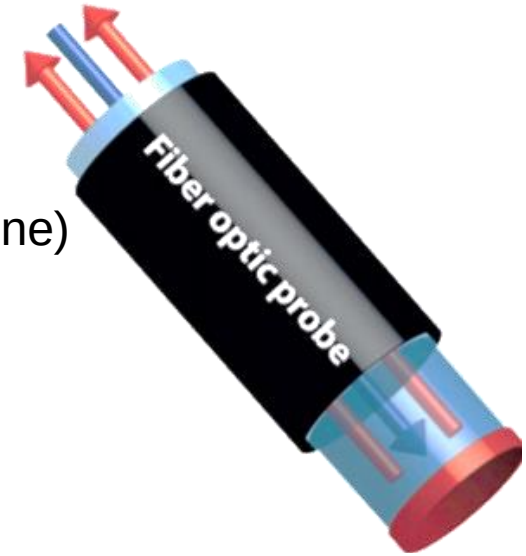


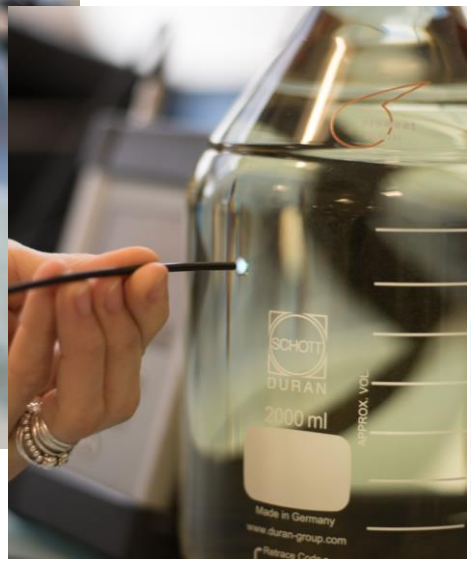
Boucif. 2012

- Comparaison de deux types de membranes :
  - Polypropylène (PP)
  - Polypropylène + Téflon (PPT)



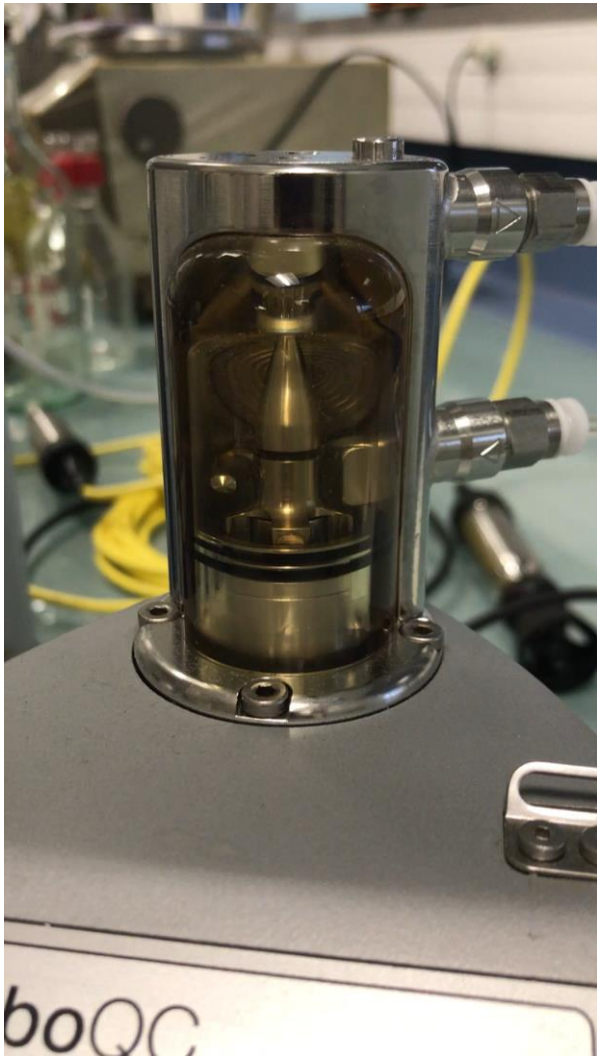
- Mesure des gaz dissous:
  - **Oxygène:** Oxymètre NOMASense®
  - Basée sur la luminescence
  - (Limite de détection= 15 µg.L^{-1}, 0 – 100 % oxygène)
  - Mesure non destructive





- Mesure des gaz dissous:
  - **Oxygène:** Oxymètre nomasense®
  - Basée sur la luminescence
  - Mesure non destructive

  - **Dioxyde de carbone:** CarboQC CO_2 Analyzer
  - Double expansion volumique
  - Mesure de la pression et de la température
  - C_{CO2}= 0-12 g/L / Ecart type répétabilité = 0.01g/L
  - Retour échantillon dans l'enceinte



- Mesure des gaz dissous:
  - **Oxygène:** Oxymètre nomasense®
  - Basée sur la luminescence
  - Mesure non destructive

  - **Dioxyde de carbone:** CarboQC CO_2 Analyzer
  - Double expansion volumique
  - Mesure de la pression et de la température
  - Retour échantillon dans l'enceinte

- Calcul du coefficient de transfert de matière: **$K_L a$**
  - Représente la capacité d'un gaz à diffuser dans un liquide
  - Calculé à partir de la loi générale de transfert de matière

$$Ln\left(\frac{C^* - C_0}{C^* - C_t}\right) = K_L . a . t$$

- Optimisation du débit du liquide

300ml/min:

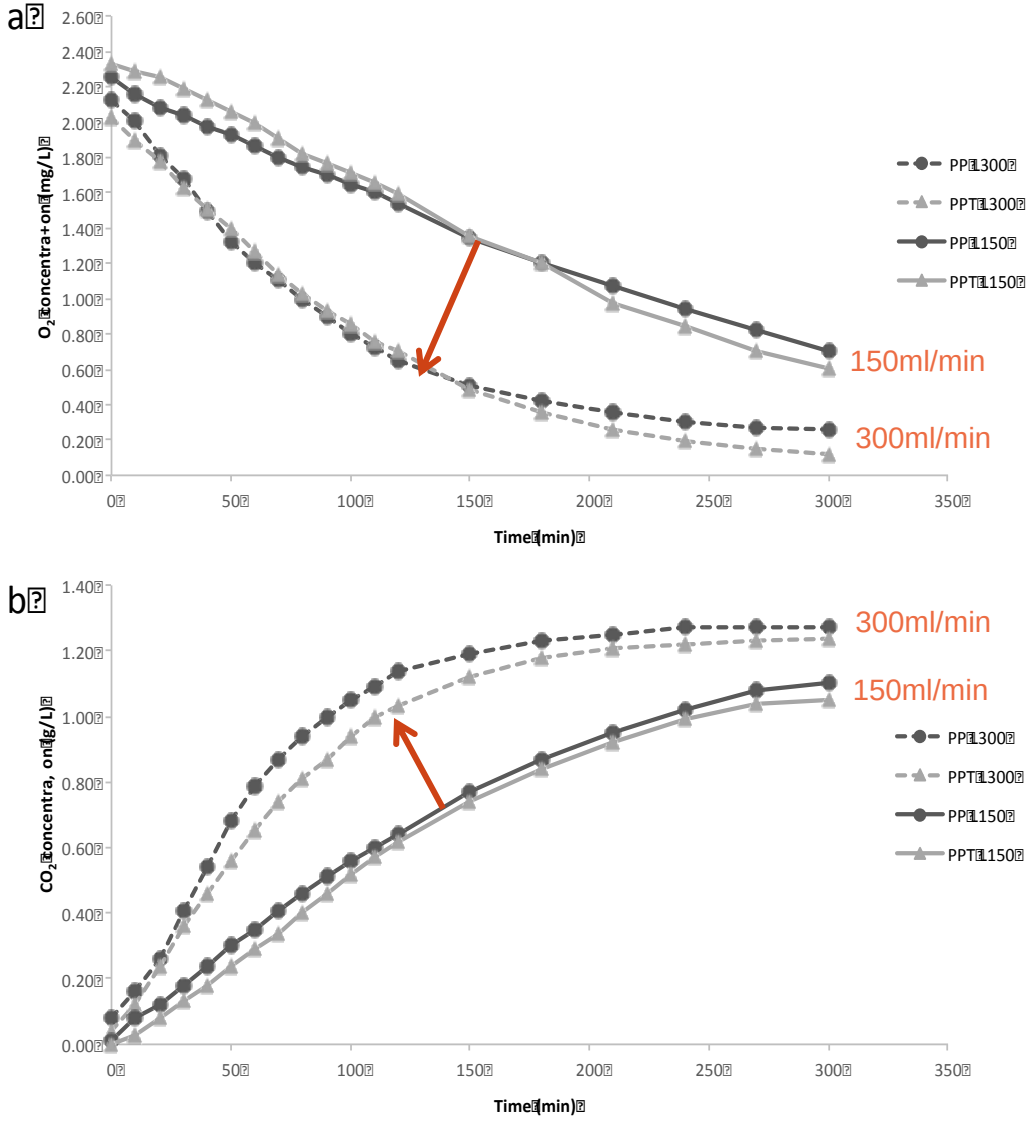
$K_L a^{CO_2}$=22.5 ×10^{-5} s^{-1} PP

$K_L a^{CO_2}$=19.2 ×10^{-5} s^{-1} PPT

150 mL/min:

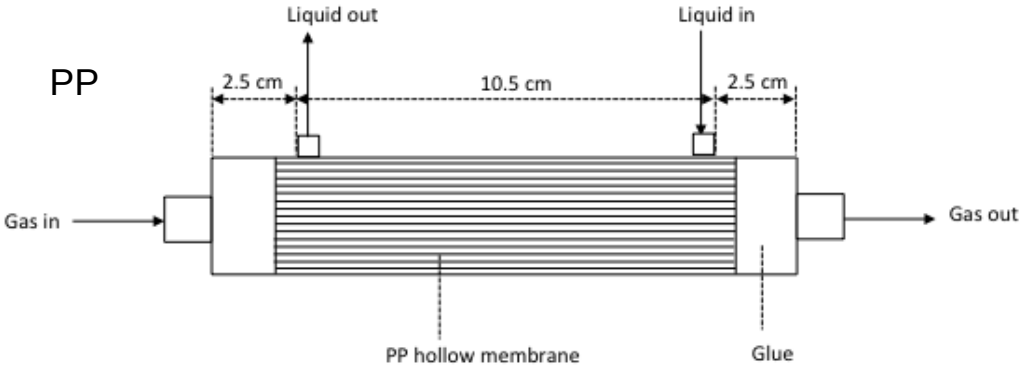
$K_L a^{CO_2}$=9.3 ×10^{-5} s^{-1} PP

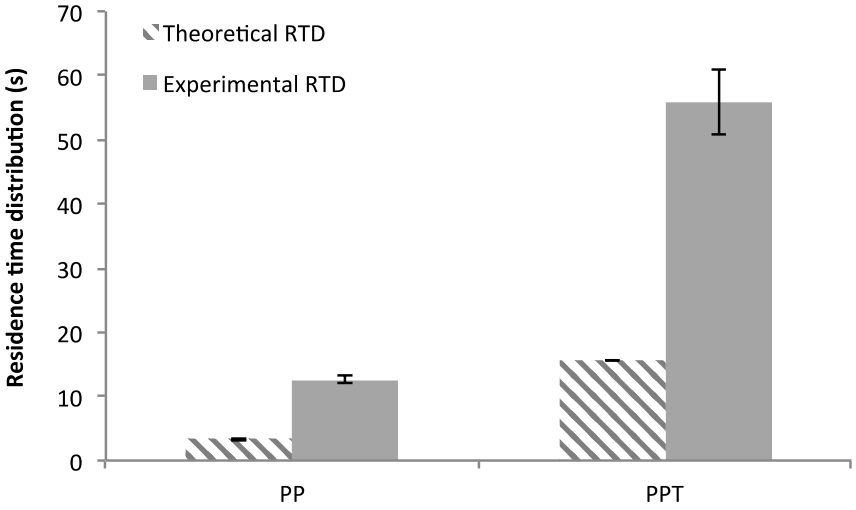
$K_L a^{CO_2}$=7.9 ×10^{-5} s^{-1} PPT

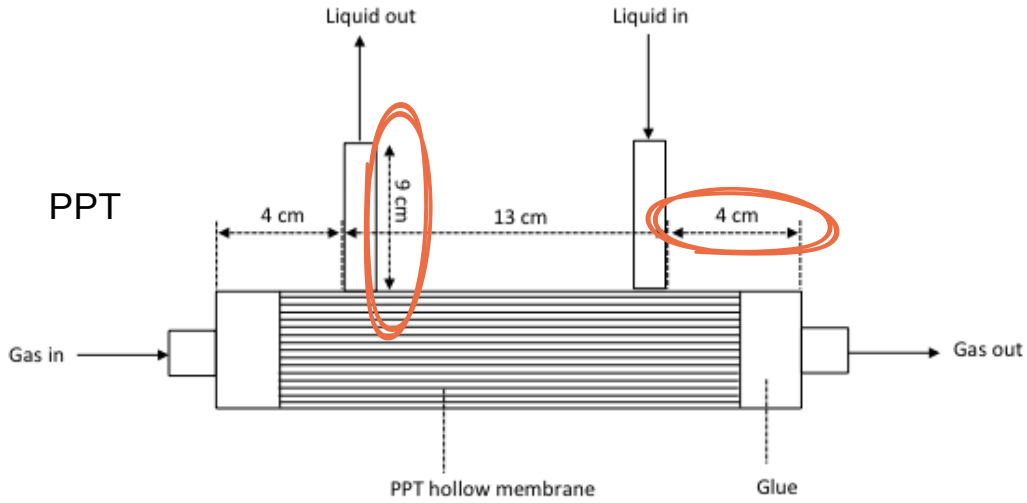


Résultats

- Caractérisation initiale: à l'eau
  - Hydrodynamique (Temps de séjour)
    - $RTD_{théo} < RTD_{exp}$
    - RTD_{exp} PPT > RTD_{exp} PP

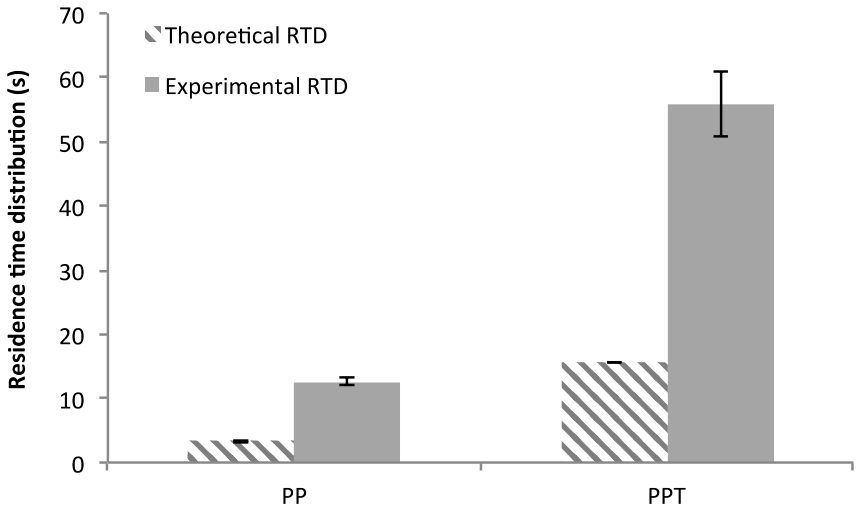


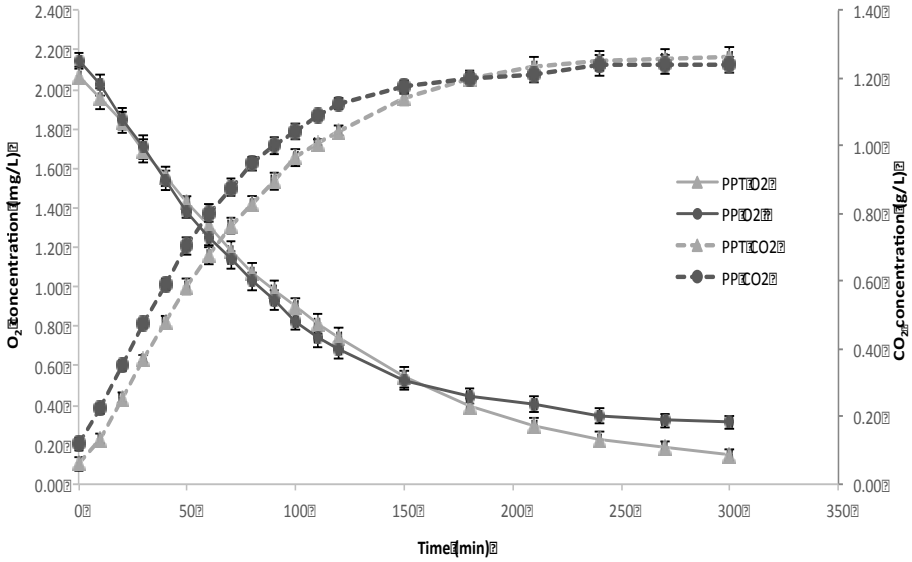




Résultats

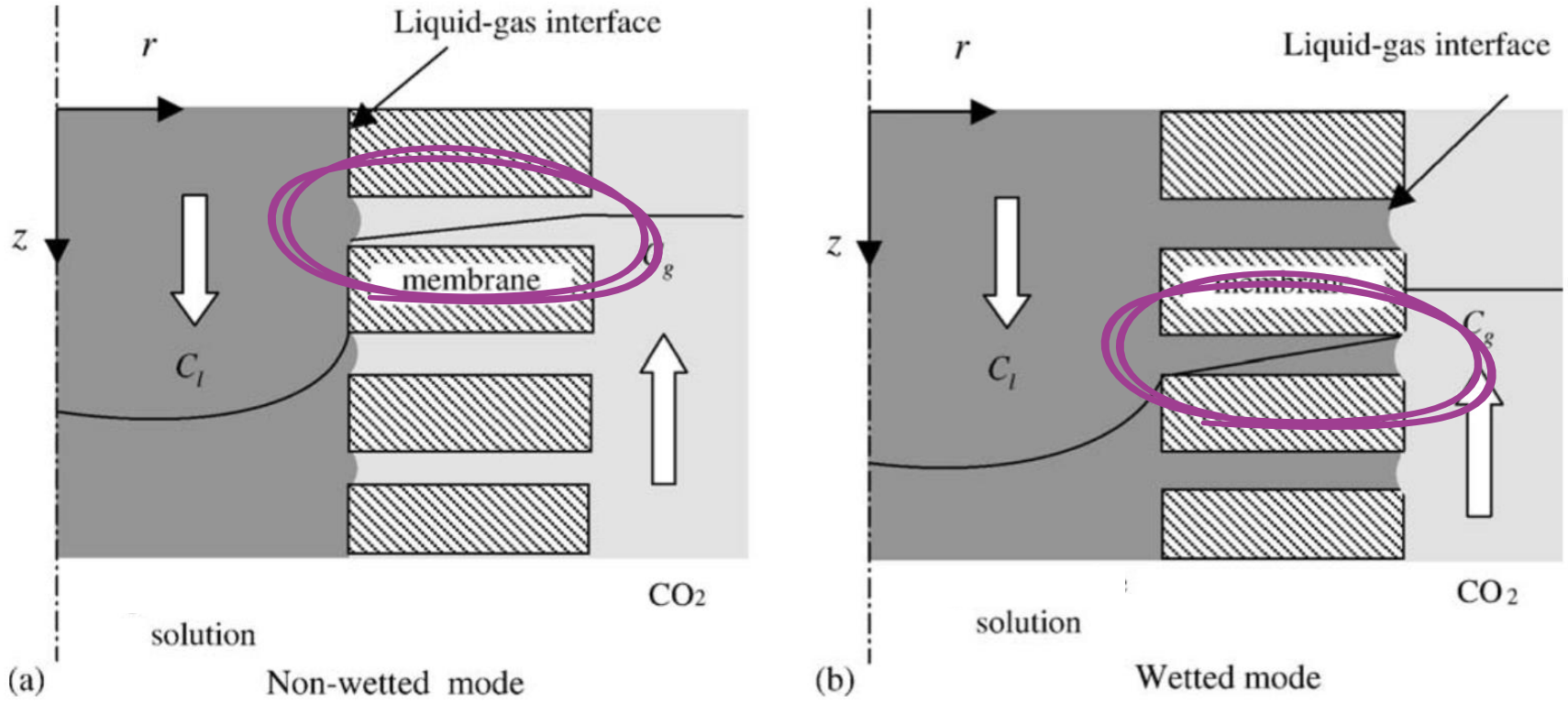
- Caractérisation initiale: à l'eau
  - Hydrodynamique (Temps de séjour)
    - $RTD_{théo} < RTD_{exp}$
    - RTD_{exp} PPT> RTD_{exp} PP
  - O_2/CO_2
    - $K_L a^{CO_2}$=21.9±0.7 ×10^{-5} s^{-1} PP
    - $K_L a^{CO_2}$=20.3±1.6 ×10^{-5} s^{-1} PPT





- Etude de la mouillabilité
  - Solution hydroalcoolique

(12% éthanol, 5g/L acide tartrique, pH3,5)



Wang *et al.* 2005

Yan *et al.* 2007

- Etude de la mouillabilité
  - Solution hydroalcoolique (12% éthanol, 5g/L acide tartrique, pH3,5)
  - Circulation solution modèle sur plusieurs heures
  - Caractérisation eau
  - $K_La^{CO_2}$ PP et PPT constant
  - Absence de phénomène de mouillage des pores

PP		PPT	
Temps (h)	K_La ($\times 10^{-5}$ s^{-1})	**Temps (h)**	K_La ($\times 10^{-5}$ s^{-1})
0	20	**0**	19
24	22	**120.5**	21.2
89.5	23	**399**	21.6
305.5	22		

- Etude de colmatage
  - 2 types de vin (vin rouge)

Deux indices de filtrabilité

FI<20:

- K_La constant

FI>20:

- PP: Diminution K_La = colmatage
- Ajout couche Téflon limite colmatage

FI<20

PP		PPT	
Temps (h)	K_La ($\times 10^{-5}$ s^{-1})	**Temps (h)**	K_La ($\times 10^{-5}$ s^{-1})
0	24	**0**	23
17	23	**110**	23
116	22	**178**	22
184	23	**202**	22

FI>20

PP		PPT	
Temps (h)	K_La ($\times 10^{-5}$ s^{-1})	**Temps (h)**	K_La ($\times 10^{-5}$ s^{-1})
0	25	**0**	23
24	19	**47**	22
72	18	**66**	21
96	14	**102**	19

Conclusion

CARACTÉRISATION

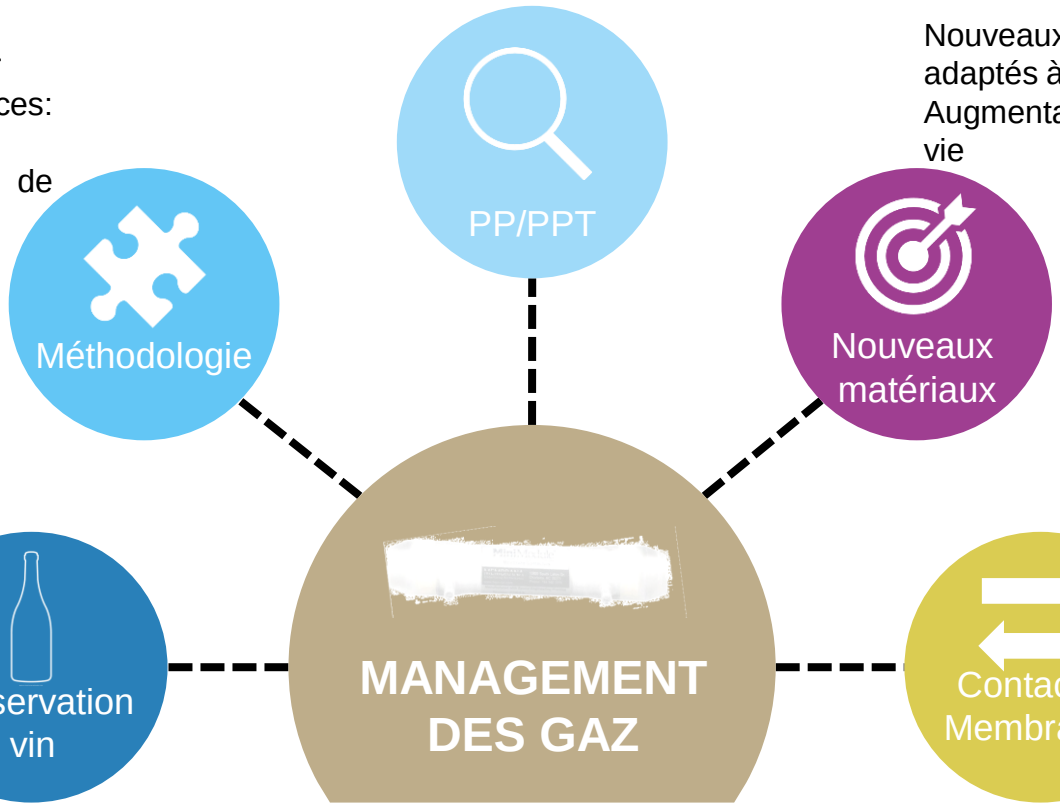
Utilisation des contacteurs membranaires
Calcul K_La
Mesure du temps de séjour
Utilisation différentes matrices: eau, solution modèle, vin
Étude de mouillage et de colmatage

EFFET AJOUT TÉFLON

Ajout d'une couche téflon peut être nécessaire pour les vins non préparés (Colmatage)

DÉVELOPPEMENT

Nouveaux matériaux mieux adaptés à la matrice vin
Augmentation de la durée de vie



OXYGÈNE

Apport d'oxygène en excès
Arômes d'oxydation lors du vieillissement

UTILISATION

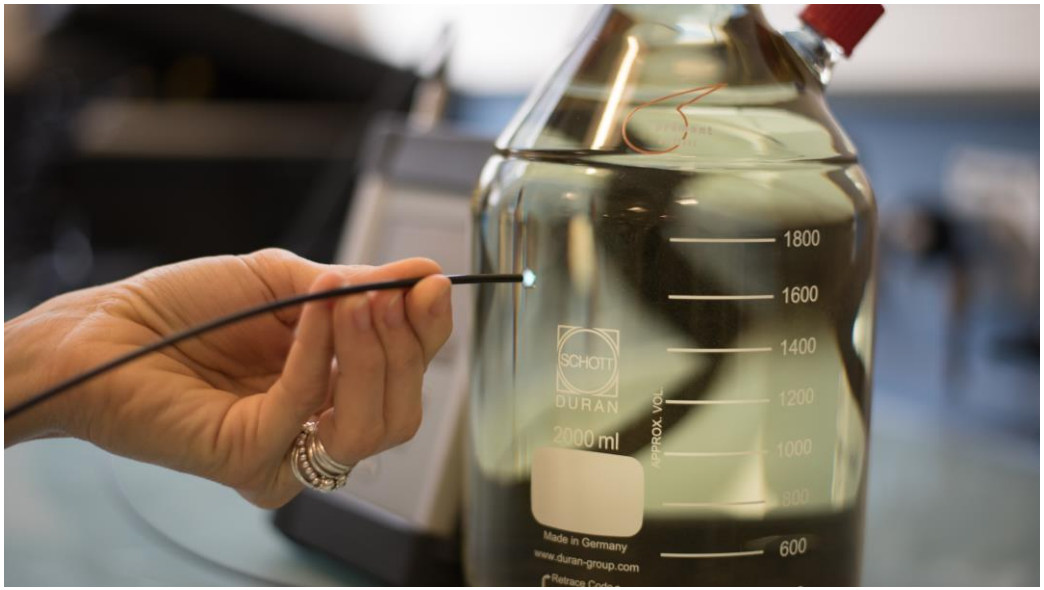
Mode combo O_2/CO_2 pour limiter l'apparition de phénomènes d'oxydation

Remerciements

Dr Liming Zeng — FUI Mo2Ve

Pr Rémy Ghidossi — Polymem

Flavien Bayrounart



Méthode pour la caractérisation des capacités de transferts de contacteur membranaire adaptée à l'œnologie

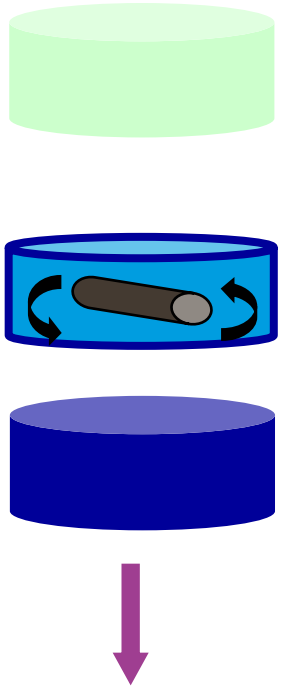
Marion Breniaux, Liming Zeng, Rémy Ghidossi

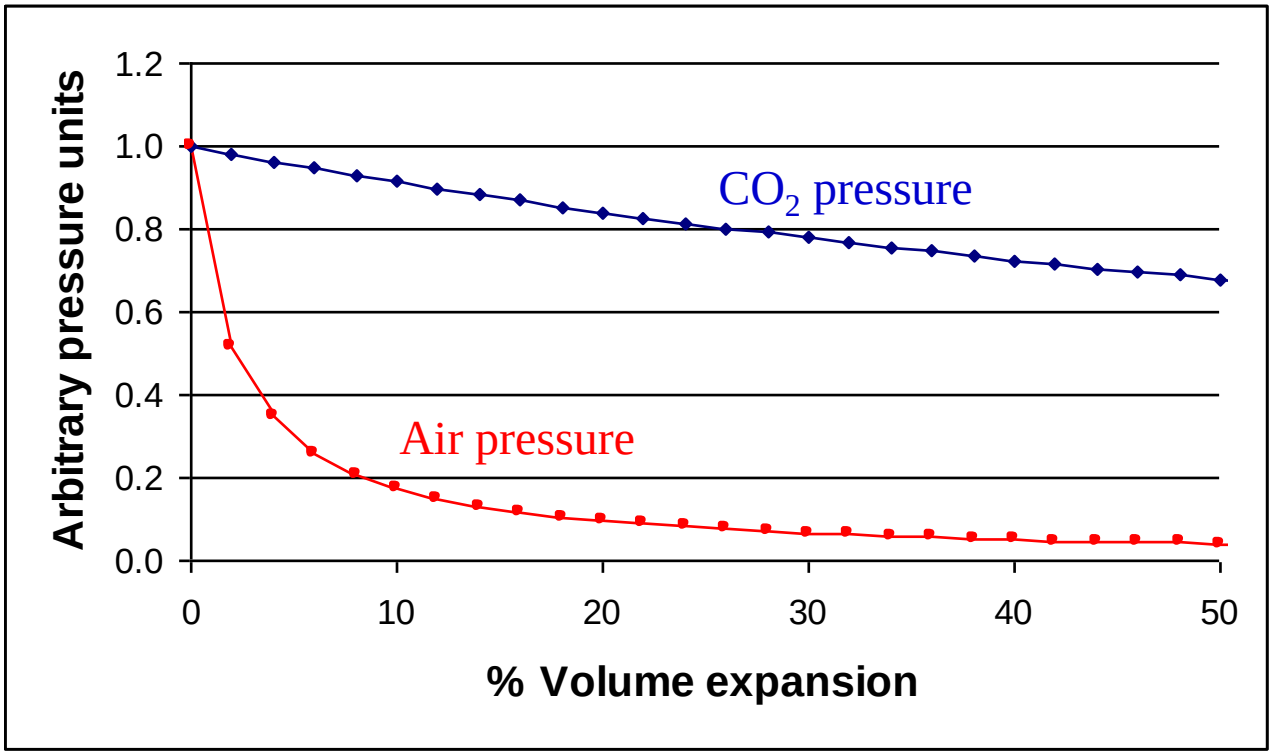
Univ. Bordeaux, ISVV, Unité Œnologie, EA 4577,
USC 1366 INRA, F-33140, Villenave d'Ornon,
France

université de BORDEAUX / ISVV INSTITUT DES SCIENCES DE LA VIGNE ET DU VIN BORDEAUX AQUITAINE

marion.breniaux@u-bordeaux.fr

Pressions CO_2 et air vs. expansion de volume





La pression d'air décroit excessivement parce qu'il n'y a que peu d'air disponible pour la hausse de pression due à sa très faible solubilité dans les boissons !

Compréhension de l'impact des conditions thermiques hydriques et aérauliques sur la qualité finale d'un coproduit séché, de l'échelle du séchoir de laboratoire à celle du semi-industriel

Sarah MONFORT

Doctorante CIFRE AGROTEC – I2M

C2i – 28 au 30 janvier - **C**olloque **I**nterdisciplinaire en **I**nstrumentation

Qu'est ce qu'un coproduit ?

Ce terme est attribué à toutes matières susceptibles d'être valorisées

Le « statut » de coproduit dépend :

- Des qualités alimentaires et hygiéniques des matières
- Des conditions économiques du moment
- Du niveau de gestion dévolu par le producteur

Différentes voies possibles de valorisation :

- Extraction de composés d'intêret
- Alimentation animale
- Compostage ou épandage …

https://www.pleinevie.fr

Choix de la pomme comme sujet support d'étude :

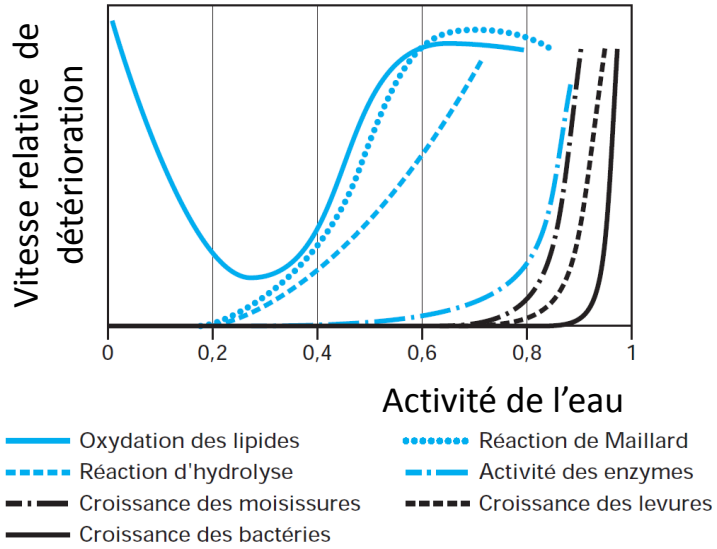
- Le fruit le plus consommé en France
- Disponible tout au long de l'année
- Se trouve sous différentes formes (tranche, gâteau de presse, marc, épiderme …)
- Nutritionnellement, riche en sucre, en fibre et en polyphénols

Pourquoi le séchage ?

- Conservation des aliments, comment ?

  En abaissant l'**activité de l'eau** pour que les microorganismes ne puissent plus se développer et que la plupart des réactions de dégradation soit ralenties.

- Diminution de son poids et de son volume.

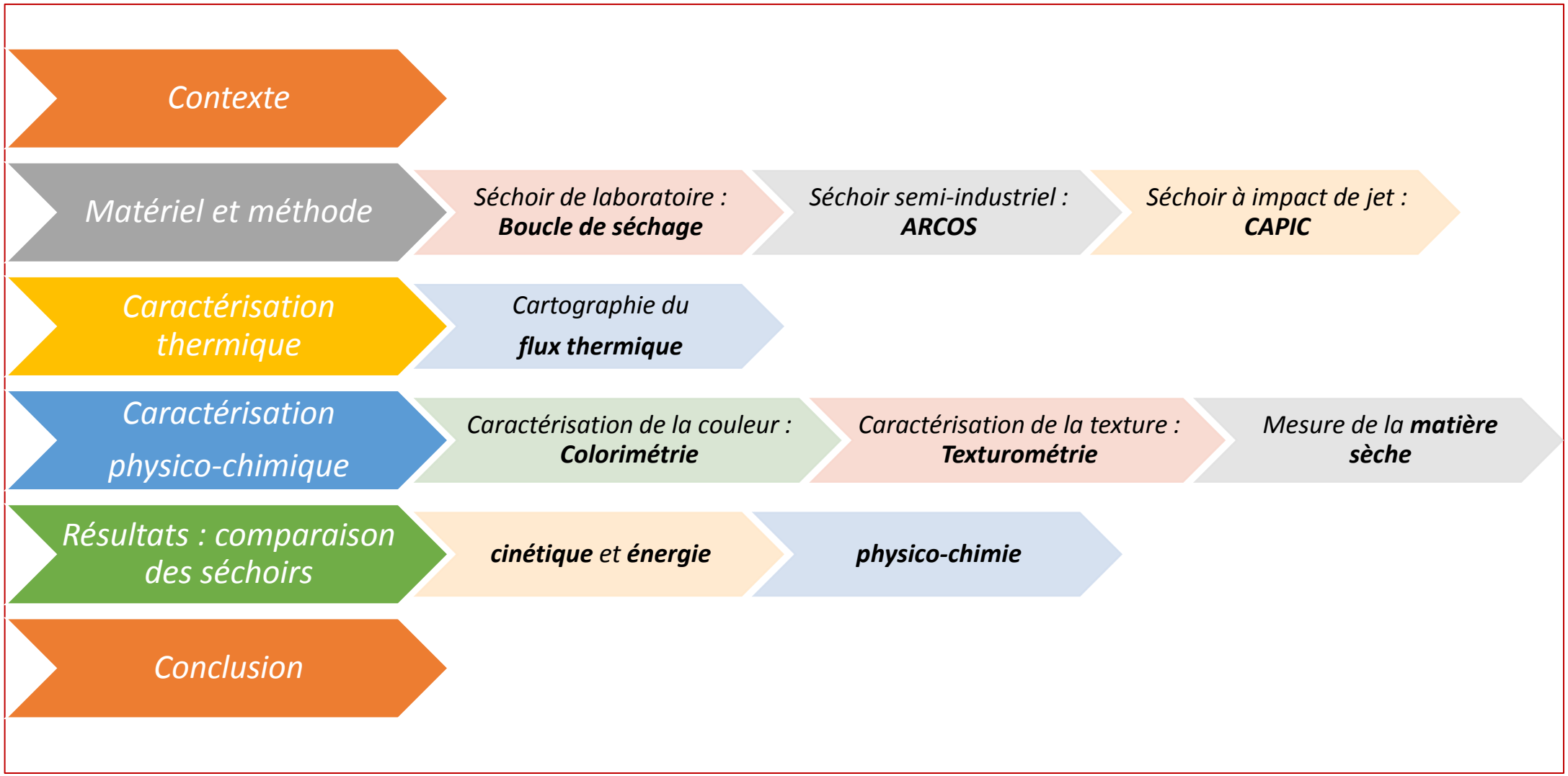


Séchage des produits alimentaires – Appareils et applications (Bonazzi C., Bimbenet J.-J.) Techniques de l'ingénieur

Objectif

Définir les **conditions opératoires** qui permettent au mieux de préserver les qualités gustatives et nutritionnelles nécessaires à la valorisation du coproduit.

Coproduit → Comprendre et Optimiser → Réduction des coûts énergétiques (•Marqueurs nutritionnels •Aspect organoleptique) → Valorisation des coproduits


Contexte
Matériel et méthode
Séchoir de laboratoire : **Boucle de séchage**
Séchoir semi-industriel : **ARCOS**
Séchoir à impact de jet : **CAPIC**
Caractérisation thermique
Cartographie du **flux thermique**
Caractérisation physico-chimique
Caractérisation de la couleur : **Colorimétrie**
Caractérisation de la texture : **Texturométrie**
Mesure de la **matière sèche**
Résultats : comparaison des séchoirs
cinétique et **énergie**
physico-chimie
Conclusion

Boucle de séchage

Apport thermique : par léchage d'air chaud (convection)

Quantité de produit : 3 tranches de pomme

Paramètres du séchoir modifiables :

- Température
- Humidité Relative
- Vitesse

} air de séchage

Paramètres récupérables :

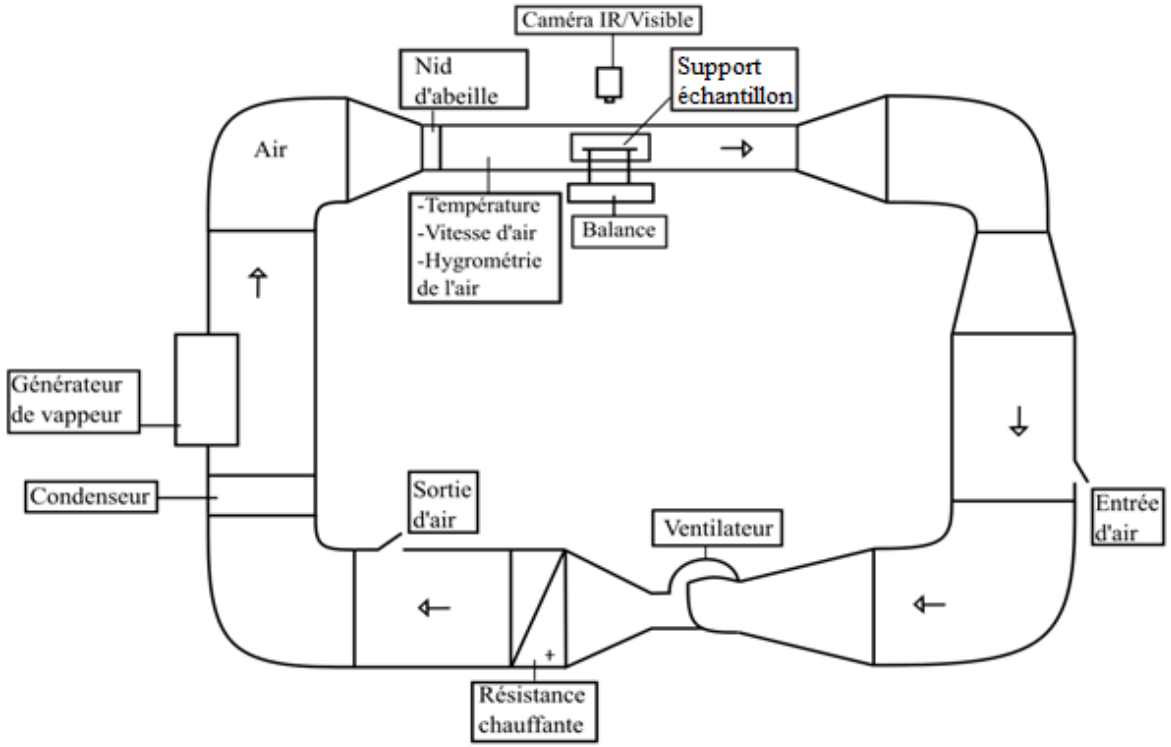
- Température
- Humidité Relative
- Vitesse

} air de séchage

- Masse
- Image (Retrait, Température)

} coproduit

Dispositif installé à I2M



Sécheur ARCOS

Apport thermique : par léchage d'air chaud (convection)

Quantité de produit : 80 tranches de pomme

possibilité de 160

Paramètres du séchoir modifiables :

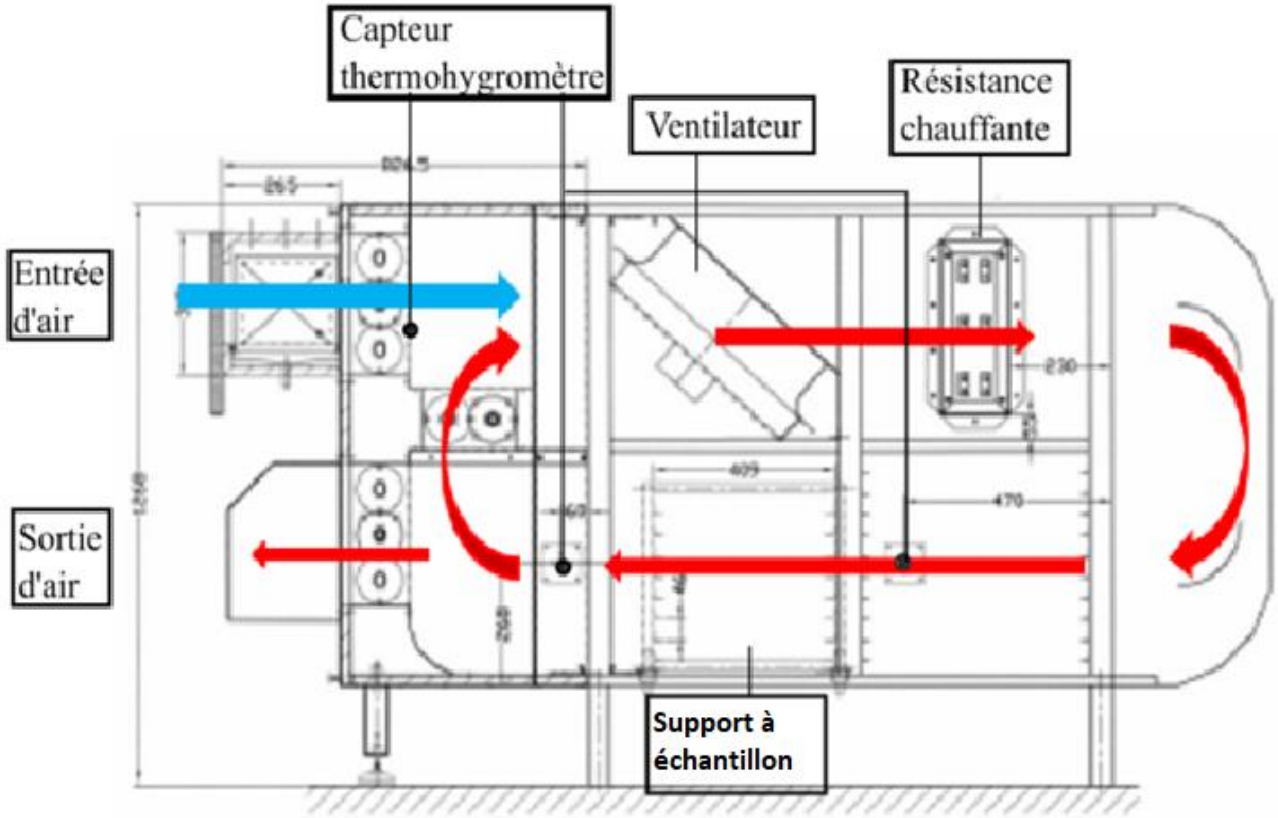
- Température
- Humidité Relative
- Vitesse

} air de séchage

Paramètres récupérables :

- Température
- Humidité Relative
- Vitesse
- Masse du coproduit

Dispositif installé à AGROTEC



Sécheur CAPIC

Apport thermique : par impact d'air chaud (convection)

Quantité de produit : 24 tranches de pomme

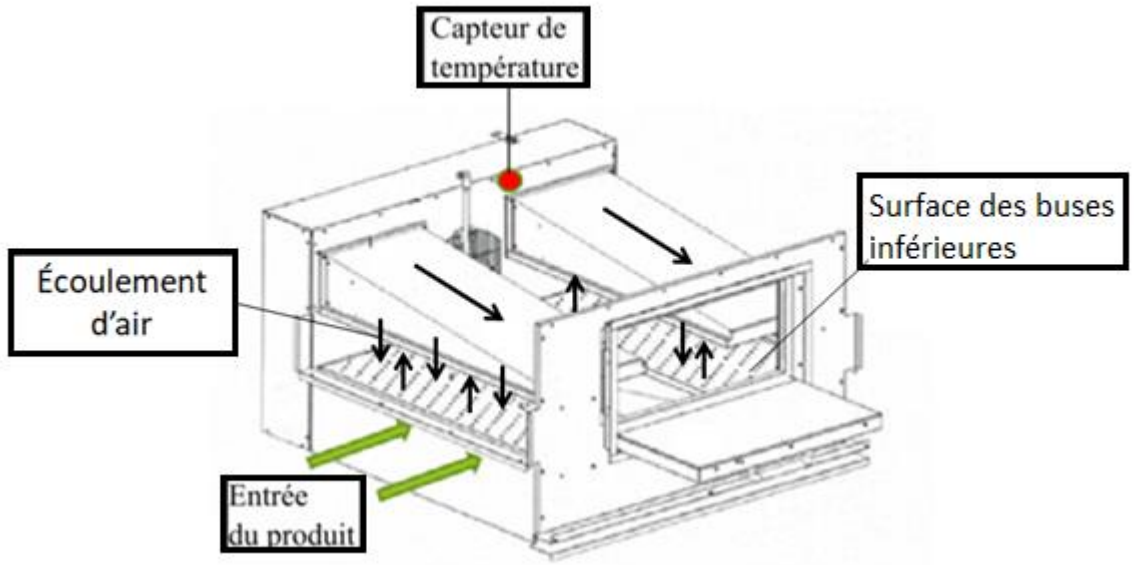
Paramètres du séchoir modifiables :

- Température

Paramètres récupérables :

- Température
- Humidité relative
- Masse du coproduit

Dispositif installé à AGROTEC

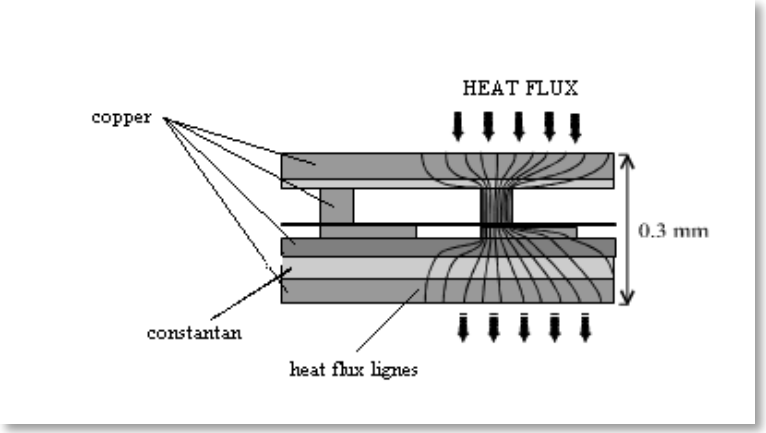


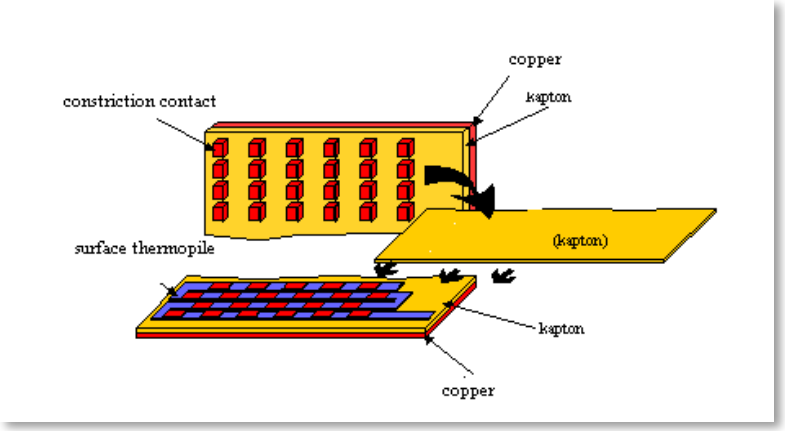
Cartographie du flux thermique

Les capteurs

Le capteur de flux de chaleur expérimental est configuré avec deux capteurs de chaleur pour mesurer le flux de chaleur total (surface noire 5x5 cm) et le flux de chaleur convectif (surface métallique, 5x5 cm)

Un thermocouple est intégré à chaque capteur (CAPTEC, France), accompagné d'un thermocouple au-dessus du capteur, dans l'écoulement d'air





Cartographie du flux thermique

Les bilans

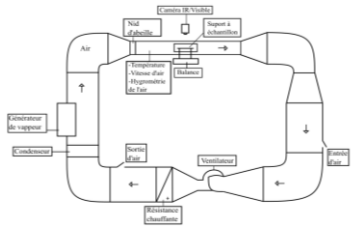
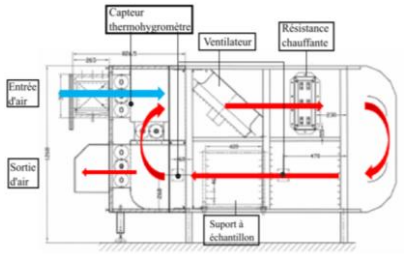
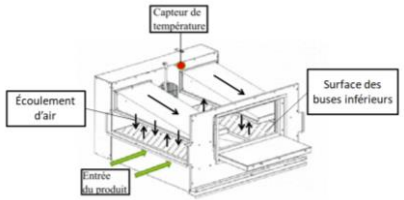
$$Q_t = Q_c + Q_r$$

En se limitant à la convection, nous avons : $Q_c = h_c(T_{air} - T_{ms})$

- h_c : coefficient de convection thermique ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
- T_{air} : température de l'air (K)
- T_{ms} : température du capteur métallique (K)

Cartographie du flux thermique

comparaison entre les séchoirs

	 Boucle de séchage	 ARCOS	 CAPIC
Flux convectif ($W.m^{-2}$)	718	358	978 (1)(max 2712)(2)
Coefficient d'échange convectif ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	27	Max 17 Min 9	Max 80 Min 40
Rapport entre le flux convectif et le flux total (%)	88 %	69%	79%

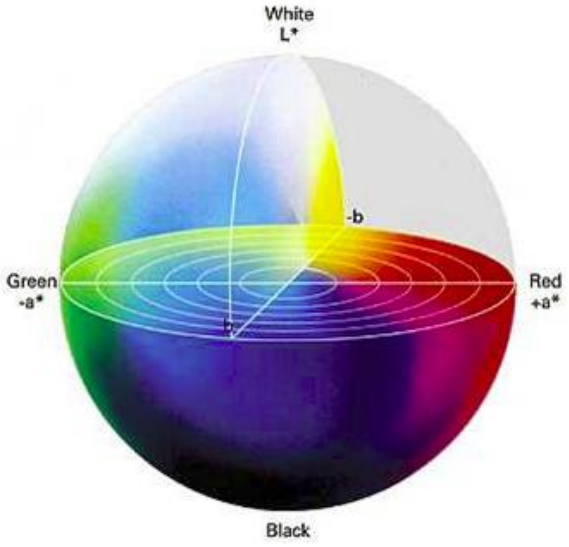
(1) Valeur moyenne sur toute la plaque du séchoir
(2) Valeur maximale sous les buses

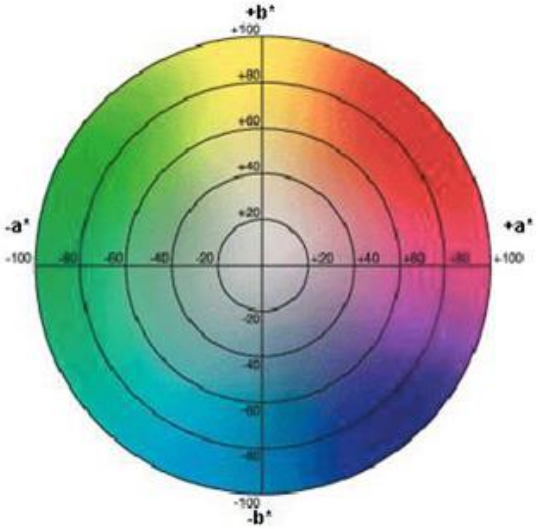
Caractérisation de la couleur

Colorimétrie

- *But :* quantifier la couleur des objets à l'aide de grandeurs physiques mesurables
- Méthode CIELab :
  - **L** indique la clarté
  - **a** du vert et du rouge
  - **b** du bleu au jaune
- Outil : chromamètre Minolta
- 15 mesures par tranche sur un lot de 10 tranches

https://cdn.laboandco.com



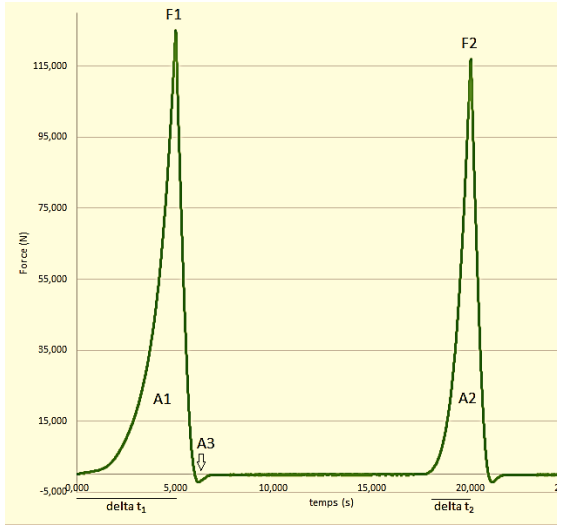


https://www.sony.be

Caractérisation de la texture

Texturométrie

- Profil de texture (TPA) : permet de « modéliser » deux morsures effectuées avec les molaires
- Mobile cylindrique de diamètre 6mm
- Programme de la TPA
  - Vitesse de pénétration du mobile de 5mm/s jusqu'à 80% de déformation
  - Le mobile est retiré
  - Renouvellement de l'opération 5 s plus tard
- Relation entre les données recueillies et les appréciations de texture :
  - l'**élasticité** = 1/delta t1
  - la **dureté** = F1
  - l'**adhésivité** = A3
  - la **cohésion** = A2/A1
  - la **masticabilité** = la dureté x la cohésion x l'élasticité



Mesure de la matière sèche

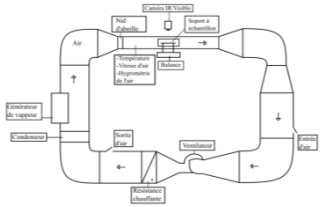
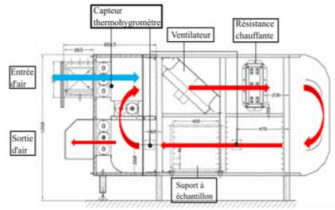
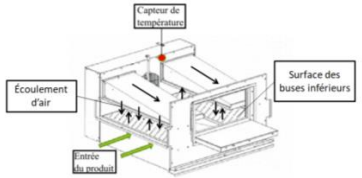
- Méthode de référence AOAC1980
  - pesée de l'échantillon avant et après mise en étuve sous vide à 70°C pour une pression de 760 mbar
  - lorsque la masse de l'échantillon n'évolue plus (après une dessiccation de 6 à 8h) obtention de la masse sèche

- Intérêt : La détermination de la matière sèche permet d'obtenir la teneur en eau du produit en cours de séchage.

$$W_{bs}(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s}$$

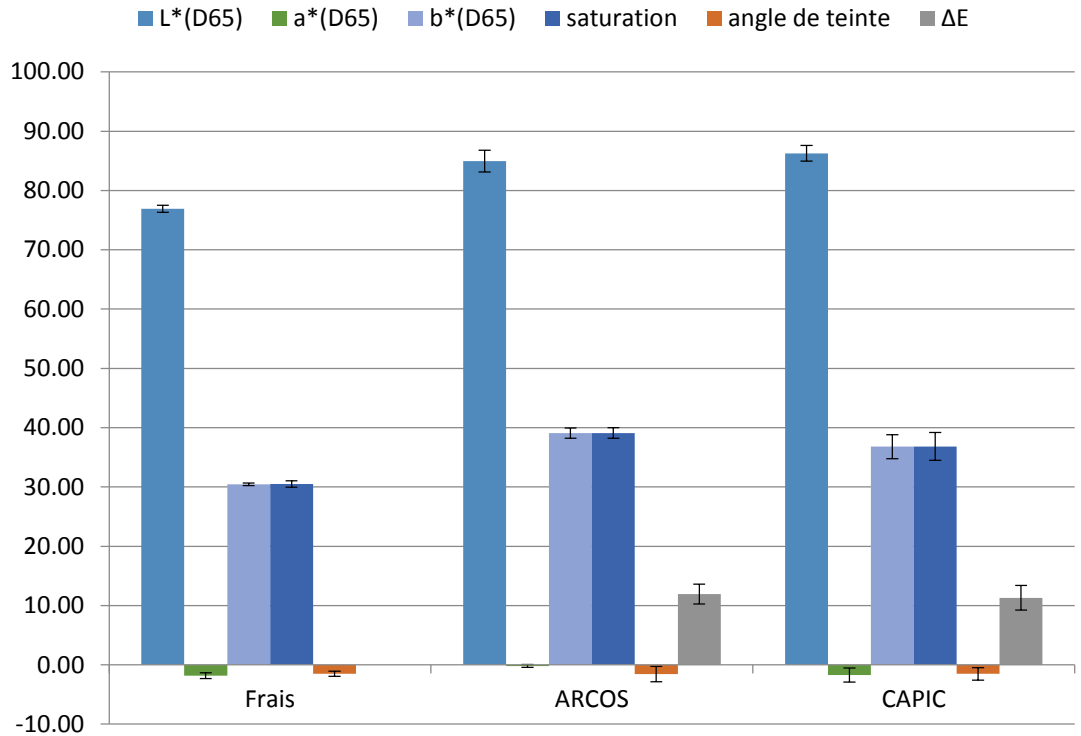
Comparaison entre les séchoirs

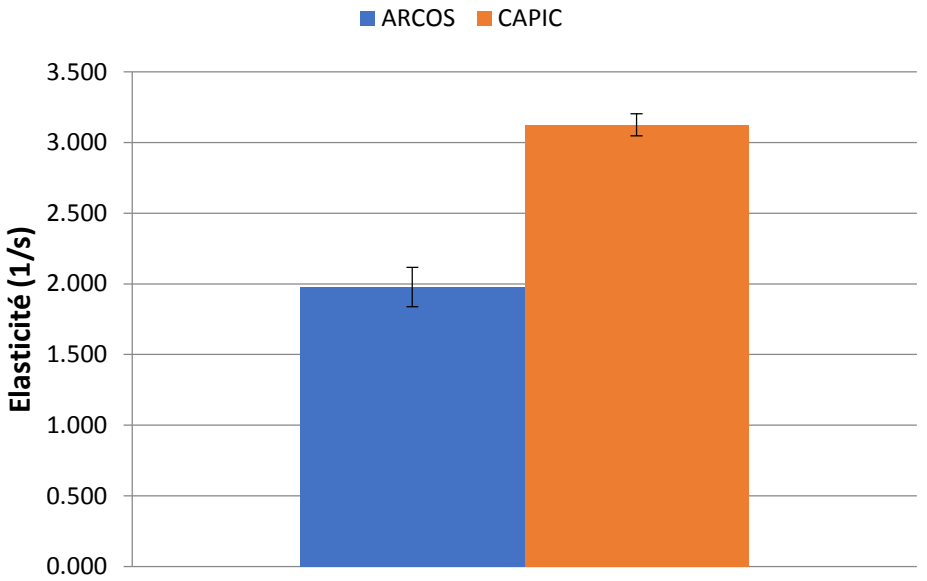
tranches de pomme épaisseur 6 mm, T_{air} = 55°C, HR_{air} = 10%, V_{air} = 3,5m.s^{-1}

	 Boucle de séchage	 ARCOS	 CAPIC
Teneur en eau final base sèche (kg_{eau}/kg_{ms})	0,15	0,19	0,17
Temps de séchage	6h30	6h30	2h30
Consommation énergétique du séchoir (kWh)	-	13	4
Masse d'eau évaporée (g)	55 (3 tranches)	1430 (80 tranches)	431 (24 tranches)
Rapport entre la consommation énergétique et la masse d'eau évaporée (Wh/g)	-	9,1	9,2

Comparaison des séchoirs

approche physico-chimique





Conclusions et perspectives

- Le jet impactant conduit à un séchage beaucoup plus rapide que le séchage par léchage pour des paramètres opératoires similaires
- La couleur n'a pas de différence mesurable par cette méthode pour le séchoir ARCOS et CAPIC
- La texture « cassante » du séchage avec le CAPIC est confirmée par la mesure de la texturométrie

En perspectives il reste à :

- Evaluer la dégradation des polyphénols (antioxydant) pendant le séchage marqueur nutritionnel choisi pour la pomme
- Définir une méthodologie rigoureuse pour identifier une technique et un barème de séchage les mieux adaptés à la conservation des propriétés gustatives et nutritionnelles du produit au cours de l'opération de séchage avec la contrainte de minimiser la consommation d'énergie
- Supportant ces perspectives une démarche « plan d'expérience » est en cours pour rationnaliser les futures réflexions en relation avec l'objectif de l'étude

Merci pour votre attention

Caractérisation de la microstructure des membranes en carbure de silicium (SiC) pour la filtration des liquides chargés

Mathilda Trevisan,

J.Vicente, A.Vincent, A.Rubio, R.Ghidossi, P.Moulin

SOMMAIRE

I. **Contexte et problématique**

II. Méthodologie

III. Résultats

IV. Conclusion

Le carbure de silicium (SiC)

Matériau de choix

Matériau avec des caractéristiques physico-chimiques intéressantes :

→ Haute résistance à la **corrosion**, à **l'abrasion** et aux **température extrêmes** (>1 000°C)

Les membranes SiC

Membranes minérales avec des caractéristiques pertinentes :

- Faible **densité** (3.21)
- Importante **porosité** (> 40%)
- Haute **hydrophobicité** (Θ_{eau} = 85.5°)
- Haute résistance aux **pH extrêmes** (0 à 14)
- Haute résistance à **l'adsorption organique**

Membranes minérales s'inscrivant dans la **filtration des liquides chargés** : purification des eaux, traitement des eaux usées, des effluents industriels *etc* …

Problématique

Nouveau matériau

Connaître la **MICROSTRUCTURE** des membranes SiC et comprendre leurs **PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES** et **HYDRODYNAMIQUES**

Maîtriser et optimiser les **CONDITIONS OPÉRATOIRES DE FILTRATION** (pression, température, vitesse de circulation, et contrainte de cisaillement)

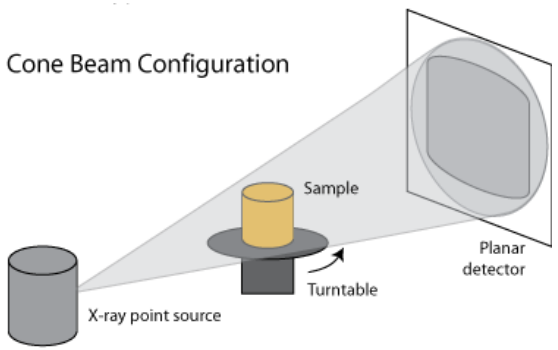
Objectif

Fournir des informations **BIDIMENSIONNELLES** (2D) et **TRIDIMENSIONNELLES** (3D) par différentes techniques analytiques :

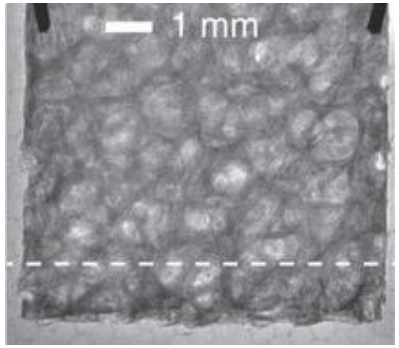
- **Microtomographie aux rayons X et traitement d'images**
- Porosimétrie par intrusion au mercure
- Microscopie électronique à balayage
- Mesures d'angle de contact

COMPARAISON

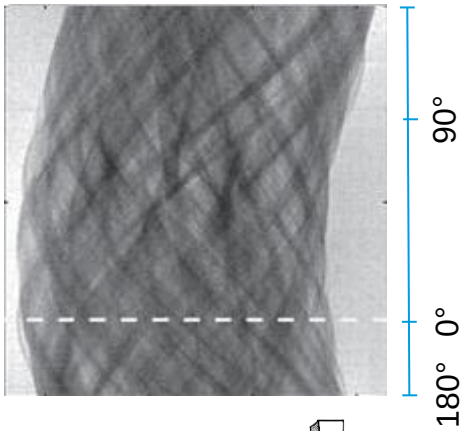
Imagerie 3D : Principe de la micro-tomographie aux rayons x



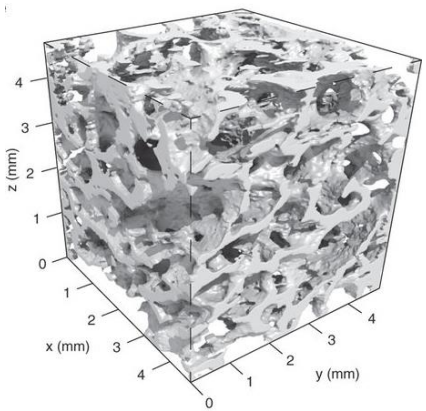
Projection tomographique



Sinogramme

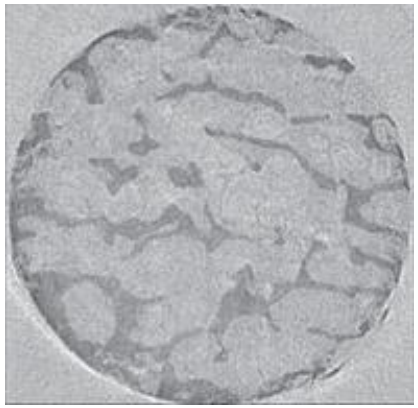


- Les niveaux de gris de chaque projection radiographique sont reliés au coefficient d'absorption et à l'épaisseur de l'objet.



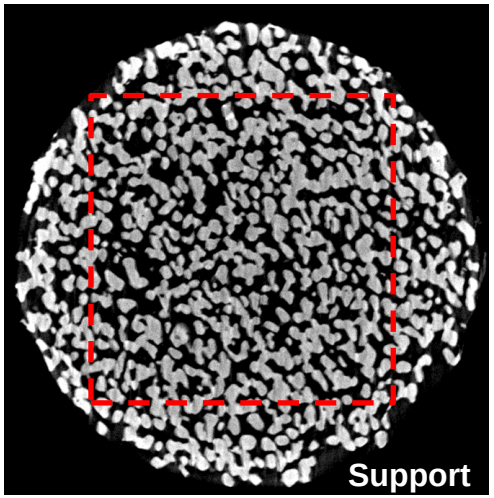
Reconstruction 3D

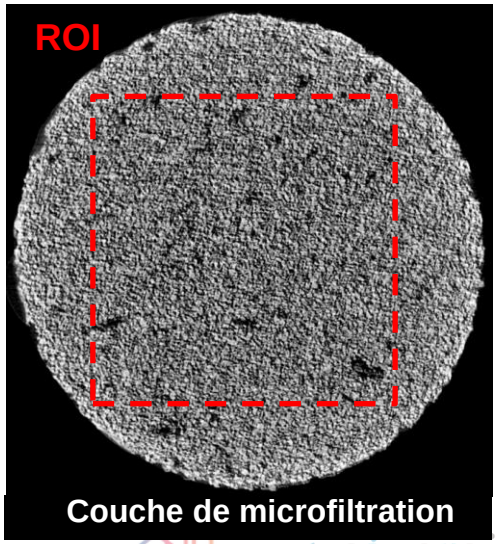
Binarisation

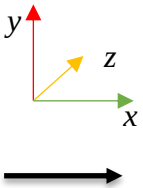


Coupe reconstruite

Imagerie 3D : Traitements des données

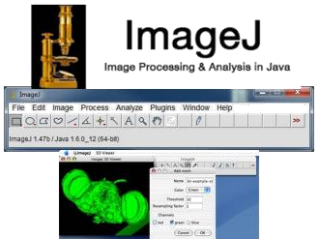






Logiciels d'analyse

Binarisation



Caractérisation morphologique

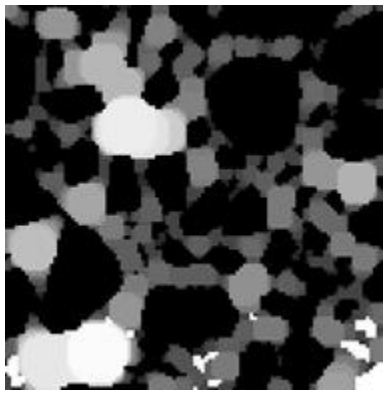
Informations **PERTINENTES** pour la filtration

- Porosité
- Granulométrie
- Tortuosité
- Taille et morphologie des pores et constrictions
- Seuil de coupure (MWCO)
- Pourcentage de connexion
- Anisotropie
- *etc* …

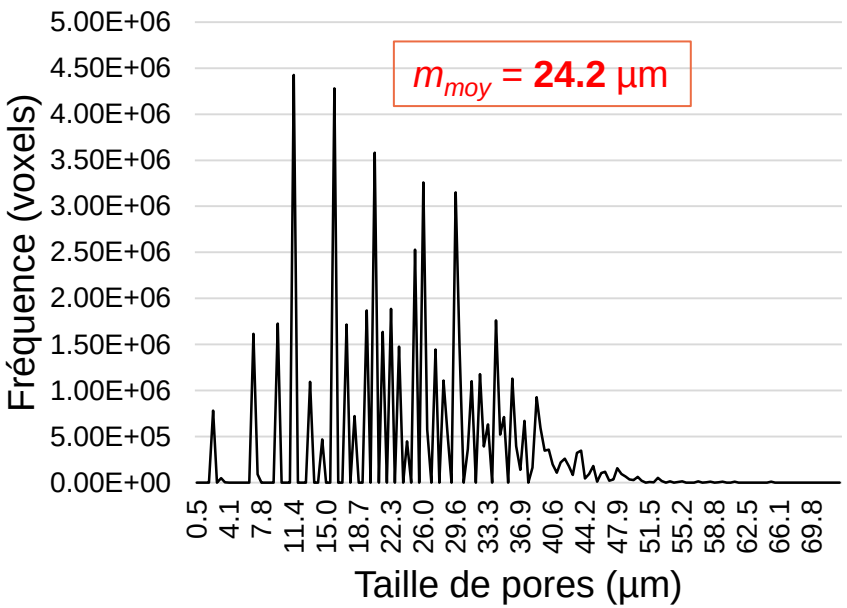
Taille de pores

Carte 3D d'ouverture : pavage de l'espace par des sphères

- En chaque pixel de l'espace poral est reporté le **DIAMÈTRE DE LA SPHÈRE** maximale contenant ce point.

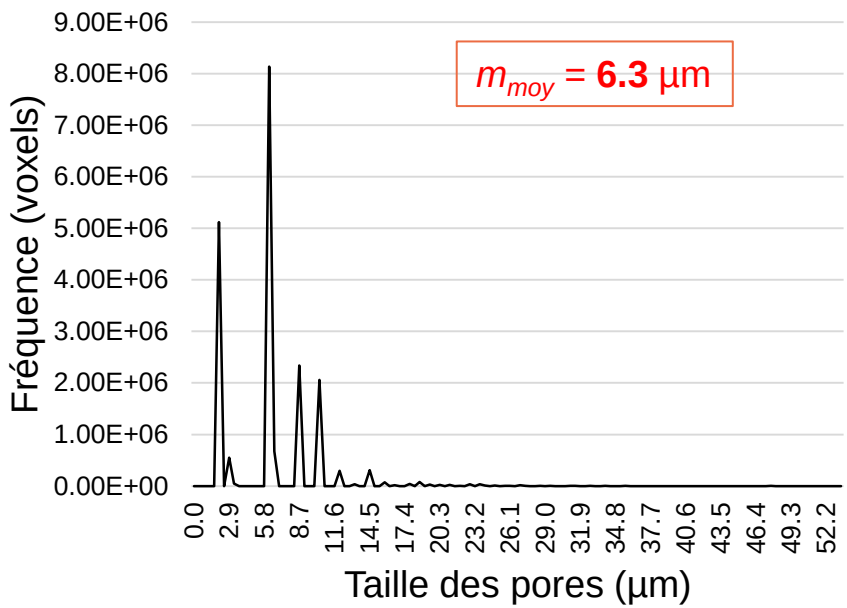


Support mécanique



1 voxel = 2,28 µm

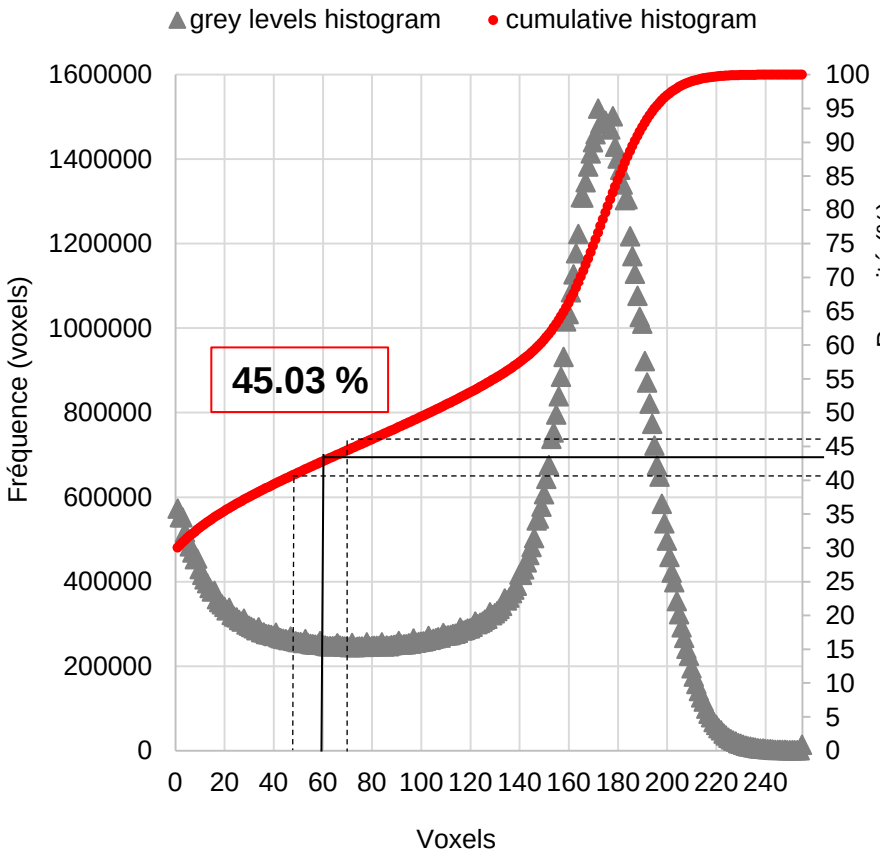
Couche de microfiltration



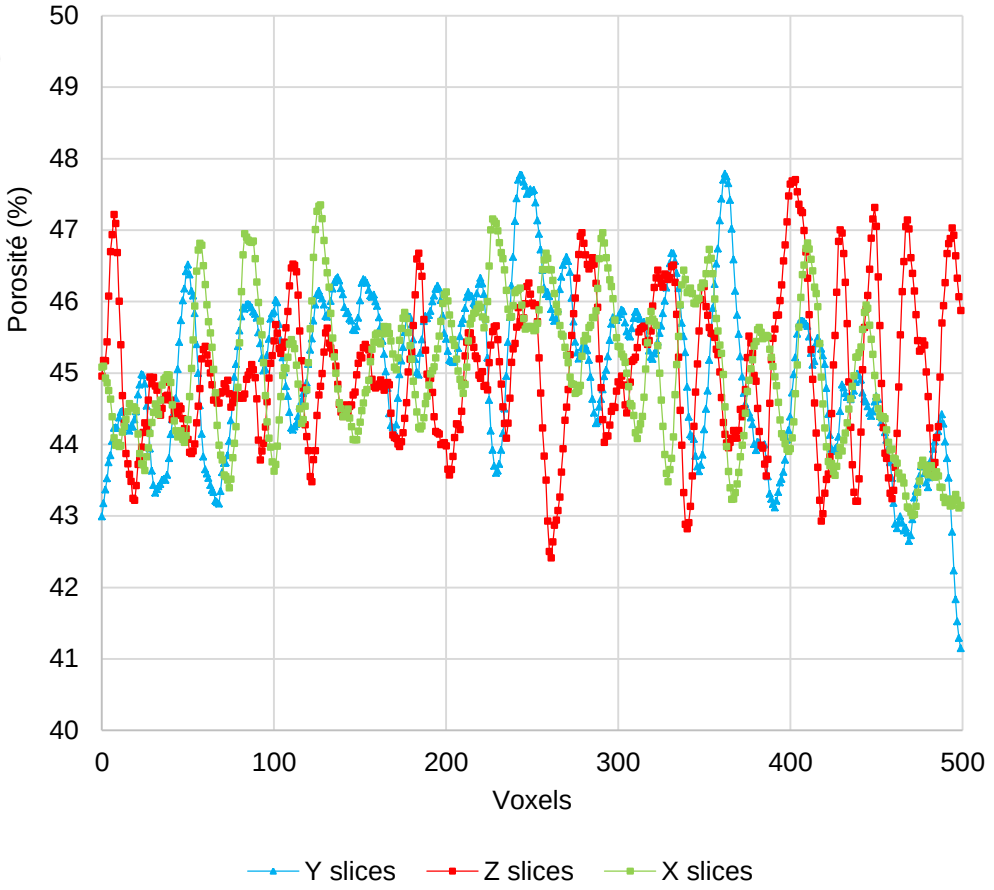
1 voxel = 2,07 µm

Porosité / Binarisation

Porosité cumulée sur le support mécanique



Distribution de la porosité du support mécanique

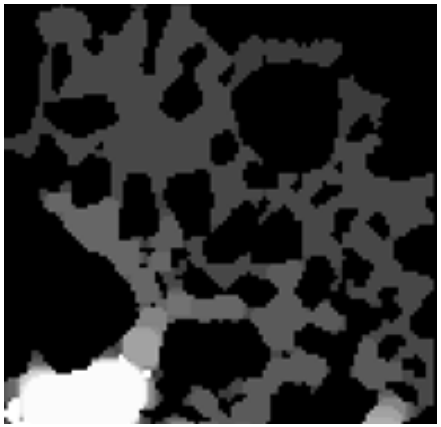


- Le **SEUIL DE BINARISATION** = zone **D'INFLEXION** de la distribution cumulée des niveaux de gris.
- **BINARISATION** validée → caractérisation **MORPHOMÉTRIQUE** différentes phases : solide et poreuse.

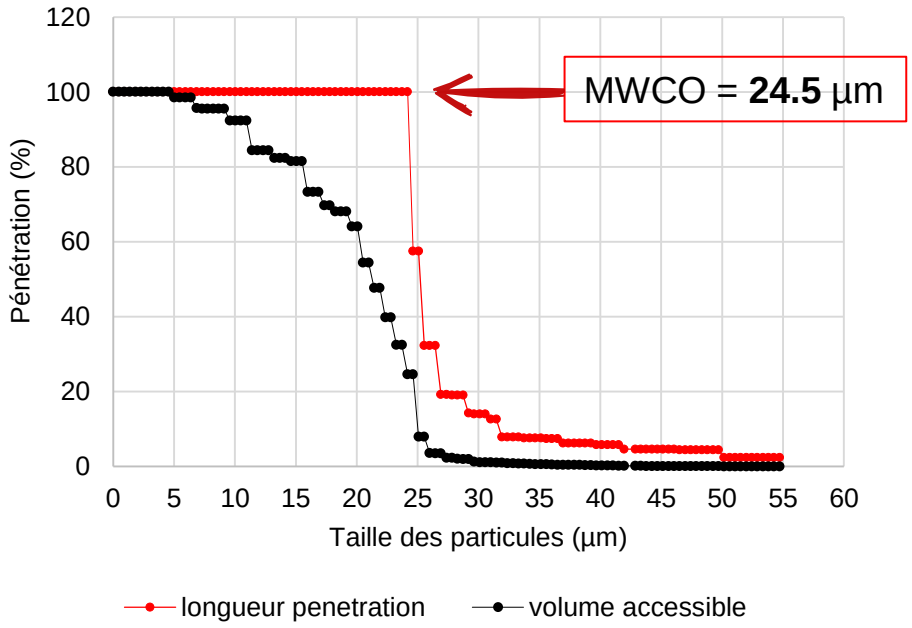
Seuil de coupure (MWCO)

Carte 3D d'accessibilité

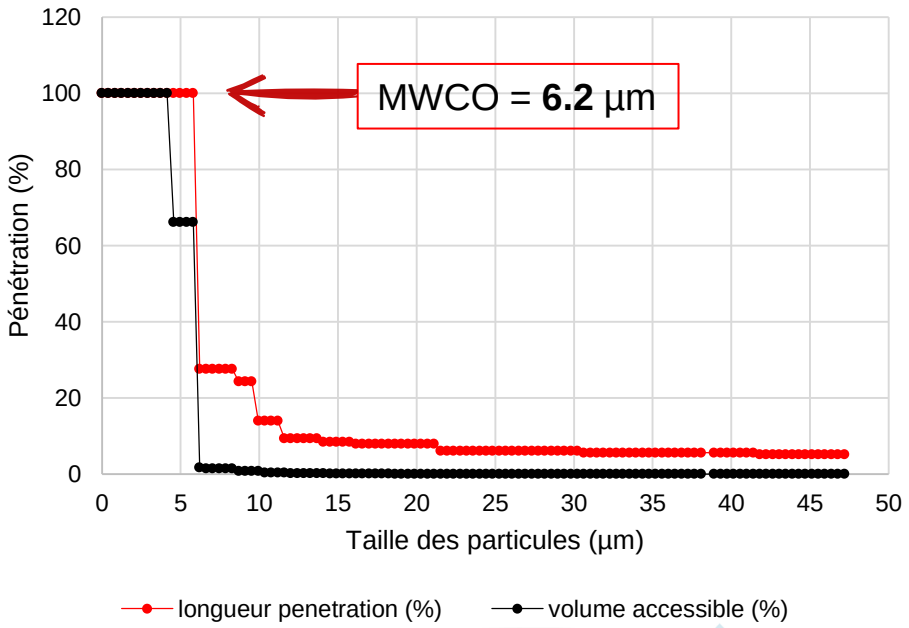
- En chaque pixel de l'espace poral est reportée le **DIAMÈTRE DE LA PLUS GRANDE PARTICULE** permettant d'atteindre ce point depuis une face d'entrée.



Support mécanique



Couche de microfiltration



Résultats de l'analyse de la phase porale par différentes techniques

Support mécanique				
	Imagerie 2D	Imagerie 3D	Porosité mercure	Données fournisseur
Taille des pores (µm)	30.5 ± 5.0	**24.2 ± 10.0**	24.34	25.0
Porosité (%)		**45.0 ± 0.2**	45.5	< 40
MWCO (µm)		**24.5**		25
Volume poral connecté (%)		**99.9**		

Couche de microfiltration				
	Imagerie 2D	Imagerie 3D	Porosité mercure	Données fournisseur
Taille des pores (µm)	5.2 ± 2.4	**6.3 ± 3.7**	4.3	4.0
Porosité (%)		**37.1 ± 0.3**	39.9	< 40
MWCO (µm)		**6.2**		4.0
Volume poral connecté (%)		**99.9**		

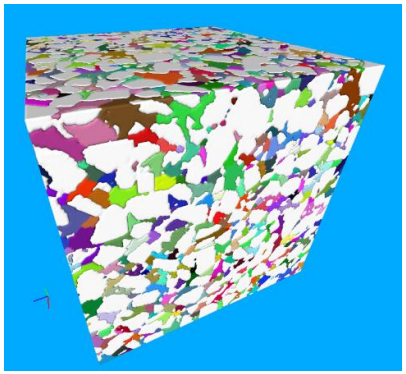
- L' **ANALYSE DE L A PHASE PORALE** des deux échantillons obtenue grâce aux différentes techniques de mesure : imagerie 2D, 3D, et porosité par intrusion au mercure.

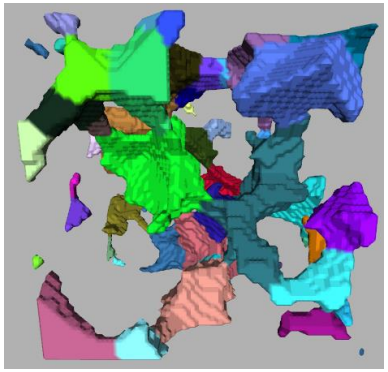
→ Résultats **REPRODUCTIBLES** et **CONCORDANTS** pour toutes les techniques d'analyses utilisées.

→ Résultats de **l'IMAGERIE 3D VALIDÉS** avec les techniques de mesure classiques et permettent de mettre en évidence de nouvelles informations : longueur de pénétration des particules, volume accessible, volume poral connecté etc …

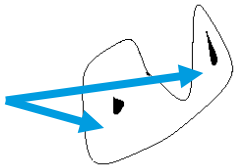
Taille et morphologie des pores et constrictions

- Segmentation de l'espace poral par la méthode de la ligne de partage des eaux à partir des érodés ultimes.





Érodés Ultimes



Identification des centre de pores

Identification des constrictions (zone de contact en 2 pores segmentés)

Support mécanique

	Cellules	Constrictions
	moy	*moy*
Ø (µm)	**27.9** ± 13.3	**18.2** ± 10.9
2a (µm)	**38.3** ± 18.3	**13.9** ± 9.4
2b (µm)	27.1 ± 13.3	22.6 ± 13.0
2c (µm)	19.2 ± 10.9	

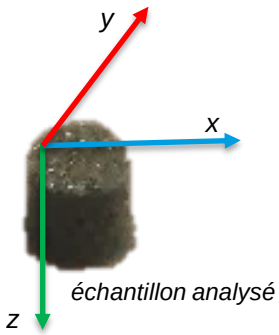
Couche de microfiltration

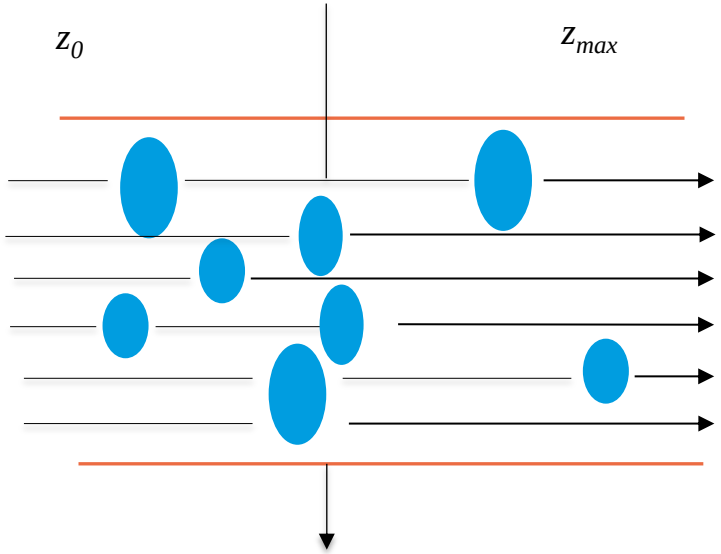
	Cellules	Constrictions
	moy	*moy*
Ø (µm)	**13.3** ± 4.8	**7.0** ± 3.3
2a (µm)	**19.1** ± 8.4	**8.9** ± 5.7
2b (µm)	12.6 ± 5.2	4.7 ± 3.2
2c (µm)	9.2 ± 3.8	

→ Pores **APLATIES** et constrictions **ÉTIRÉES**

Anisotropie

Mean Intercept Lenght (MIL)





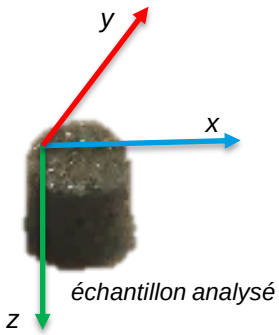
- Lignes envoyées à travers un volume d'image 3D contenant des objets binaires :

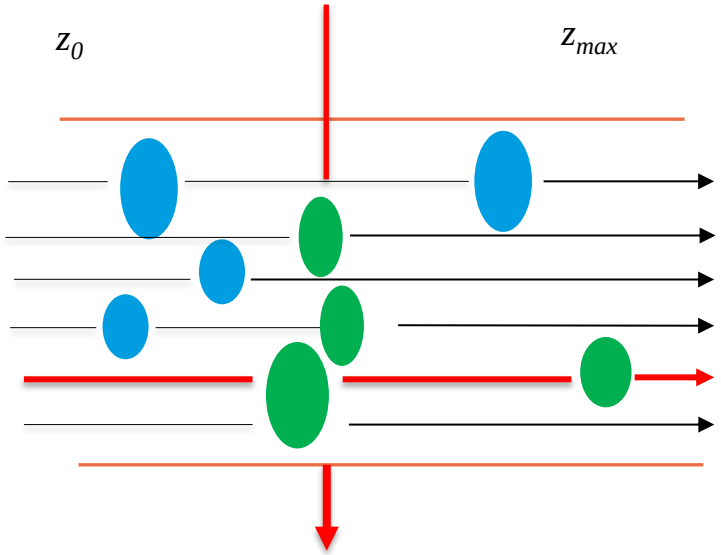
$$\frac{\text{Longueur de la ligne à travers le volume analysé}}{\text{Nombre de fois que la ligne passe à travers ou intercepte une partie de la phase solide}}$$

- Si la longueur moyenne de ces lignes sont différentes selon les 3 axes, alors le milieu est **ANISOTROPE**

Anisotropie

Mean Intercept Lenght (MIL)





- Lignes envoyées à travers un volume d'image 3D contenant des objets binaires :

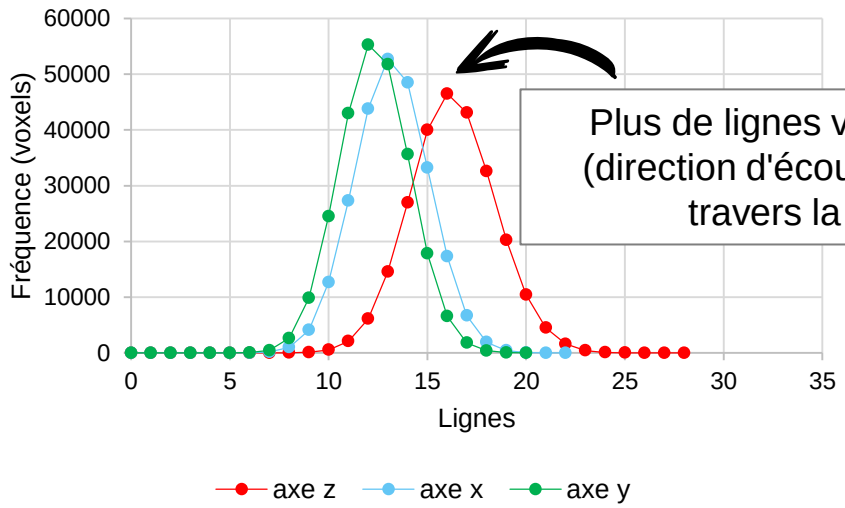
$$\frac{\textbf{Longueur de la ligne à travers le volume analysé}}{\textbf{Nombre de fois que la ligne passe à travers ou intercepte une partie de la phase solide}}$$

- Si la longueur moyenne de ces lignes sont différentes selon les 3 axes, alors le milieu est **ANISOTROPE**

Anisotropie

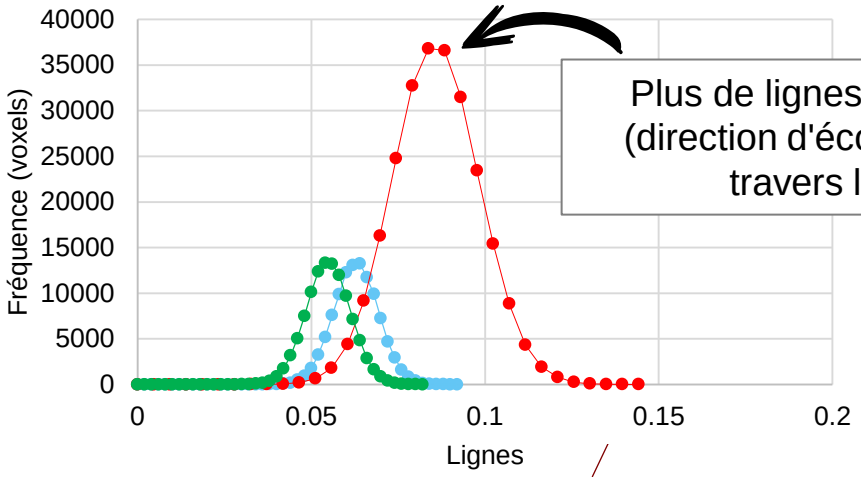
Nombre de lignes par direction

Support mécanique



Plus de lignes vers la **direction Z** (direction d'écoulement du fluide à travers la membrane)

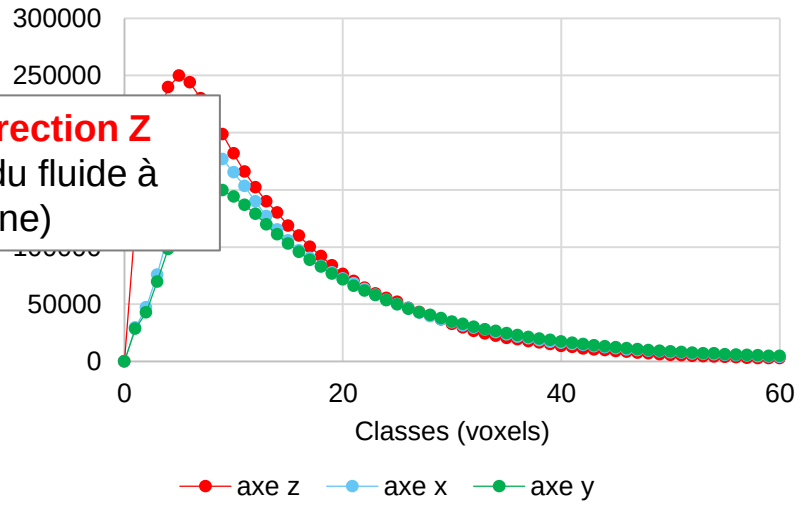
Couche de microfiltration



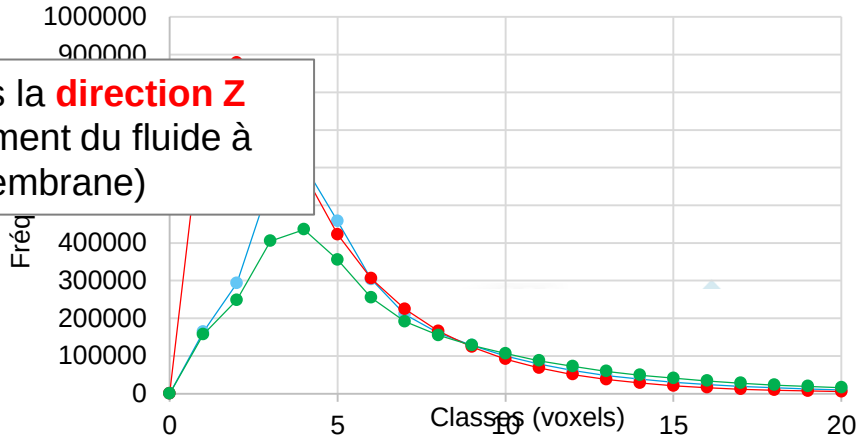
Plus de lignes vers la **direction Z** (direction d'écoulement du fluide à travers la membrane)

Longueur des cordes par direction

Support mécanique



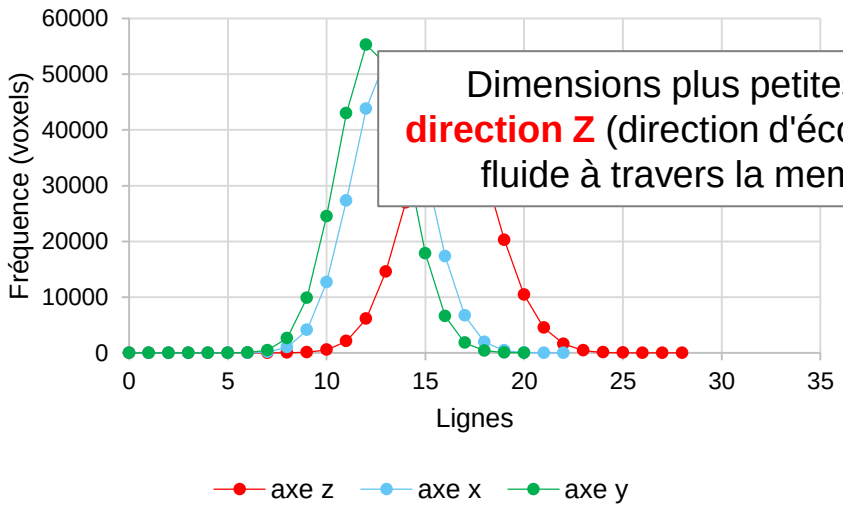
Couche de microfiltration



Anisotropie

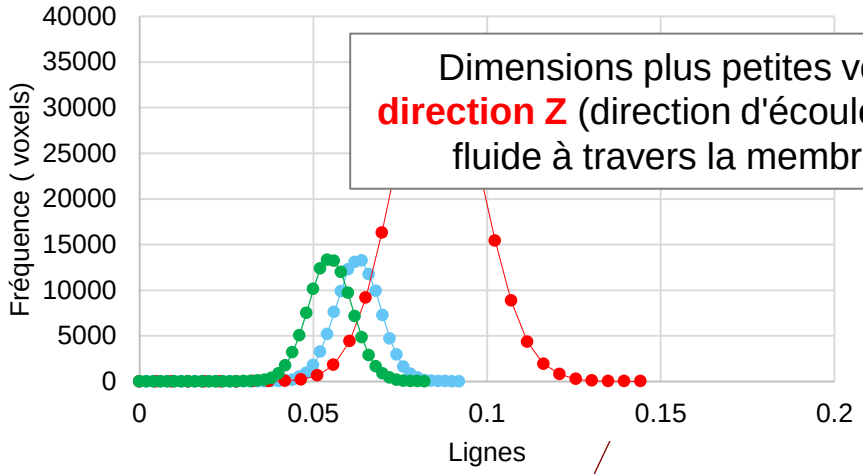
Nombre de lignes par direction

Support mécanique



Dimensions plus petites vers la **direction Z** (direction d'écoulement du fluide à travers la membrane)

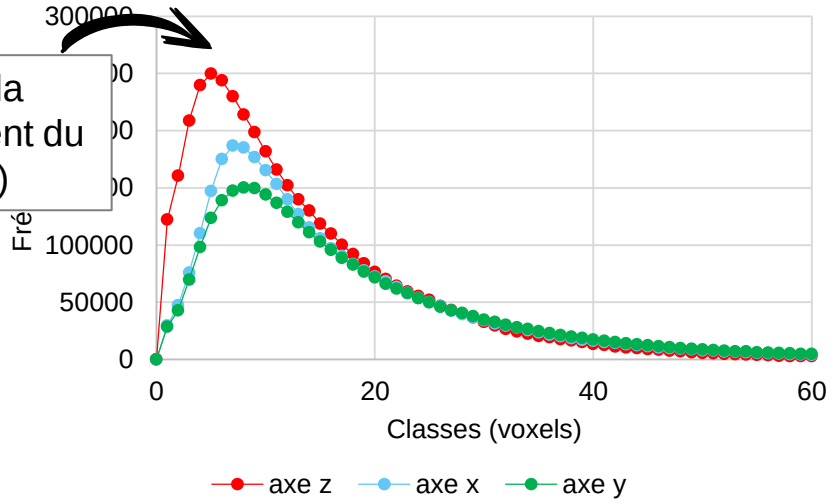
Couche de microfiltration



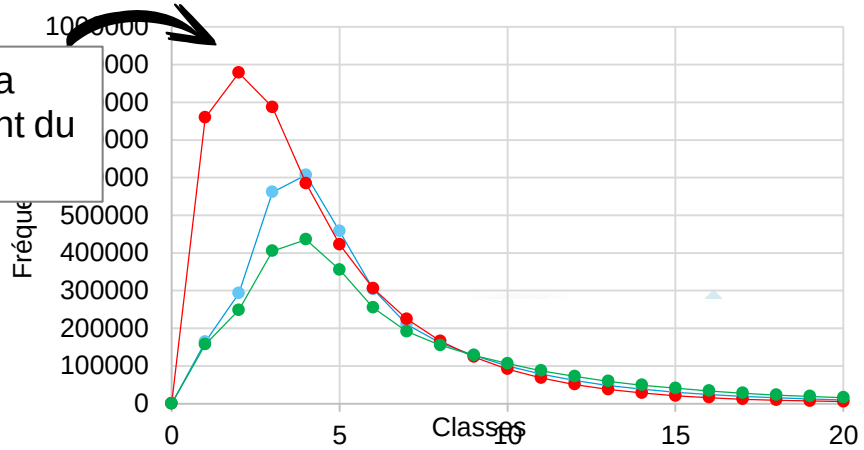
Dimensions plus petites vers la **direction Z** (direction d'écoulement du fluide à travers la membrane)

Longueur des cordes par direction

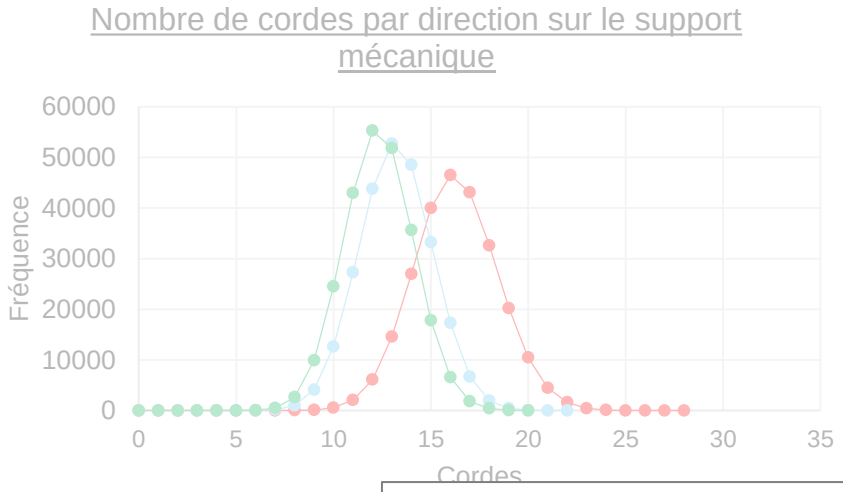
Support mécanique

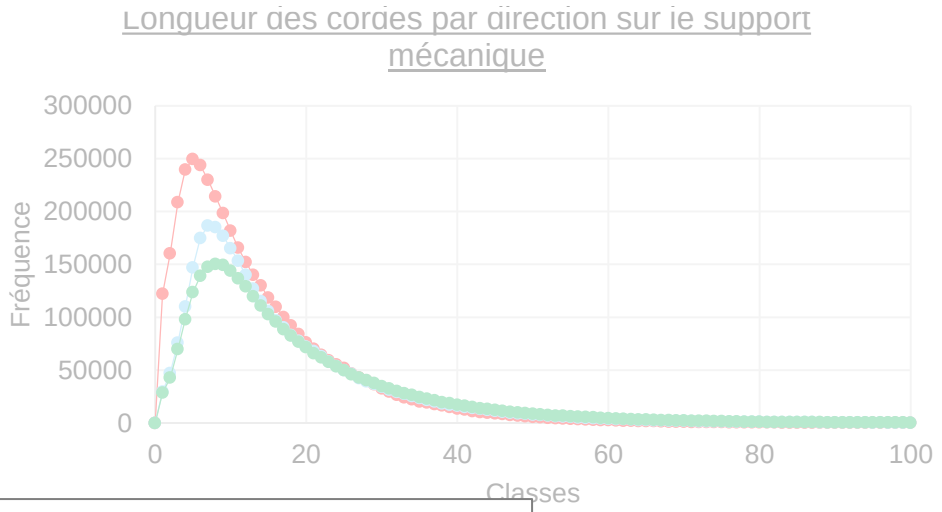


Couche de microfiltration

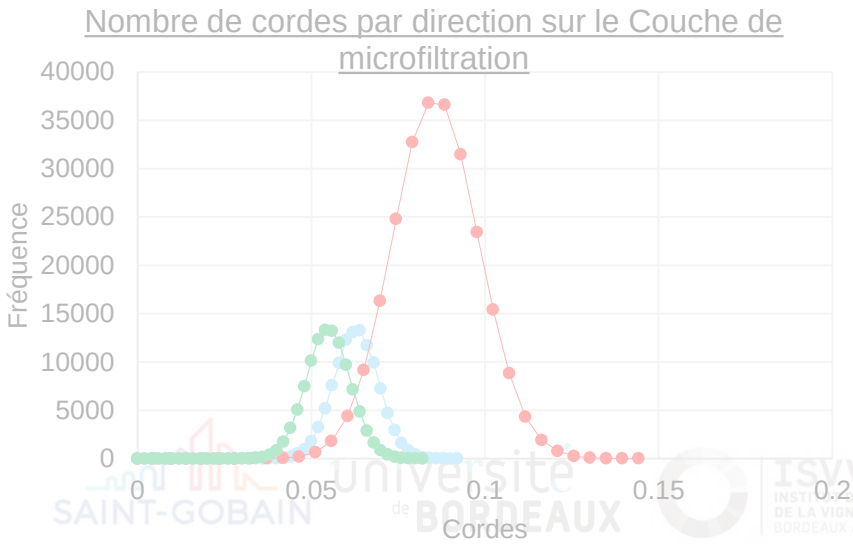


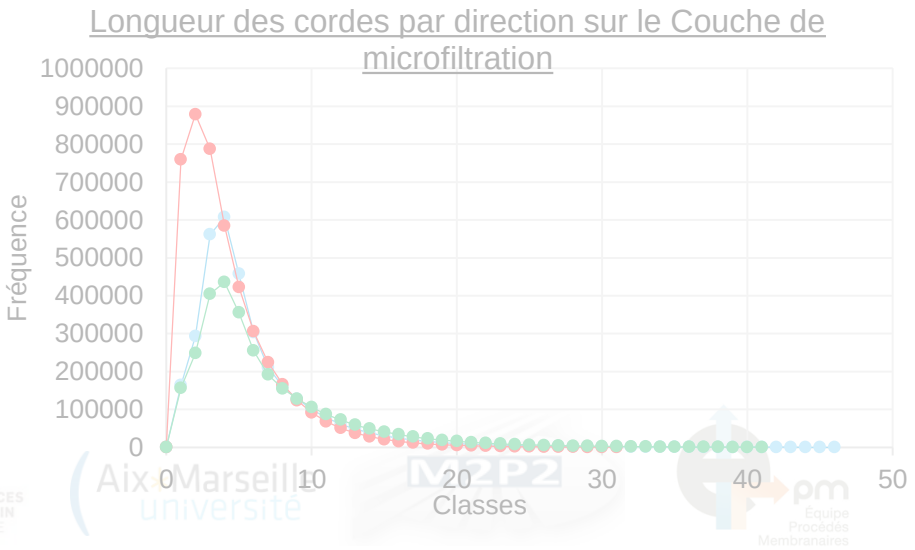
Anisotropie





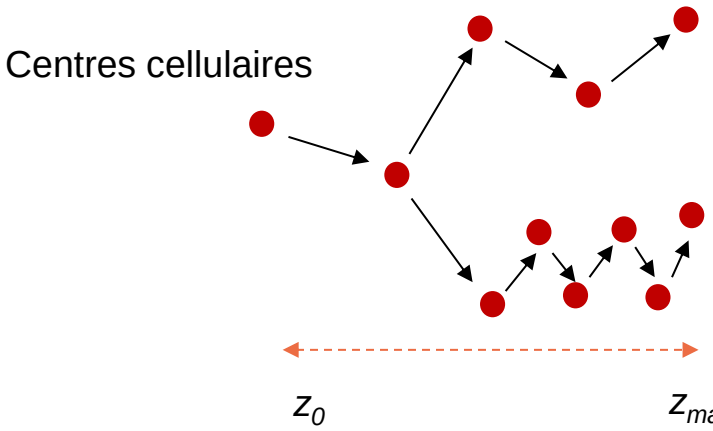
Le support mécanique et la couche de microfiltration sont **ANISOTROPES**



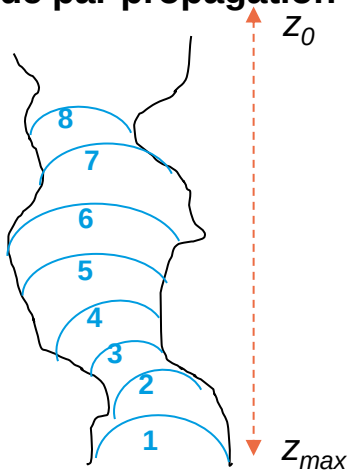


Tortuosité

Méthode des graphiques



Méthode par propagation



Distance géodésique depuis le plan d'injection

	Support mécanique				Couche de microfiltration			
	Méthode 1		Méthode 2		Méthode 1		Méthode 2	
	moy	*s*	*moy*	*s*	*moy*	*s*	*moy*	*s*
Tortuosity x	1,207	0,016	1,013	0,005	1,230	0,019	1,069	0,013
Tortuosity y	1,182	0,0175	1,009	0,004	1,172	0,013	1,047	0,009
Tortuosity z	**1,263**	0,020	**1,025**	0,007	**1,363**	0,049	**1,144**	0,035

- **Le support mécanique** et **la couche de microfiltration** : valeurs **HÉTÉROGÈNES**, plus importantes dans la direction *z*
- Support mécanique **PLUS TORTUEUX** que la couche de microfiltration
- Résultats **CONFIRMÉS** par ceux de l'anisotropie

→ **Membranes SiC moins tortueuses que les membranes minérales classiques (entre 2 et 3) : justifiant les flux de production très importants.**

Conclusion

Caractérisation 2D et 3D de la microstructure des membranes en (SiC) par plusieurs techniques d'analyses

2D : a permis de définir parfaitement la **CARTOGRAPHIE** des pores

3D : a permis d'obtenir la distribution granulométrique des différentes phases de la matrice (**SOLIDE** et **POREUSE**)

COMPRÉHENSION et la **SIMULATION** des écoulements des particules passant à travers la membrane

Appréhender l'influence des **CARACTÉRISTIQUES MICROSCOPIQUES** du matériau sur les **MÉCANISMES** de **COLMATAGE**

MWCO permet de mieux orienter le **CHOIX** des membranes pour chaque type d'application

Résultats en accord avec des flux de production nécessaires pour la **FILTRATION DES LIQUIDES CHARGÉS** comme le **VIN**

Merci de votre attention !

- Tube 150kev, 500 µA , 75W maximum et une taille minimum de foyer 5 µm
- Taille de voxel minimum : 2µm (2W), échantillon 3mm x 3mm x 5mm
- Echantillon max : cylindre 20cm(diam) x 30cm , taille de voxel 140 µm
- Durée d'acquisition:
  - 2µm →2 à 4 h
  - 5µm→ 15 à 45mn
  - 30µm → 1mn à 20mn
- Volume 3D en pleine résolution : 1451 x 1451 x 1765 (3.46 GigaVoxels)

www.cfmetrologie.com

CFM

L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

FAITES VOTRE TRANSITION MÉTROLOGIQUE

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

Colloque C2I,Bordeaux, 29/01/19

Les enjeux de la métrologie du futur

Jérôme Lopez
Directeur Technique du CFM

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

QUI SOMMES-NOUS ?

Lieu d'échanges sur les bonnes pratiques Mesure et Métrologie entre Utilisateurs et Professionnels

L'offre

- Découvrir « **la mise en pratique** »
- Rencontrer les « **bonnes** » personnes
- Trouver plus rapidement les « **bonnes** » solutions

Le Public

- RM, RQ, RL, Technicien, Ingénieurs, Universitaires…
- De la TPE aux Grands Groupes
- Tous les **secteurs d'activités industriels**

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

RÉSEAU

Plus de 640 Adhérents

ROLEX
gsk
essilor INSTRUMENTS
TOTAL
BUREAU VERITAS
LABOCEA
L'ORÉAL PARIS
EDF
NAVAL GROUP

Diffusion à 30 000 contacts

Conseil d'Administration

LABORATOIRE NATIONAL DE MÉTROLOGIE ET D'ESSAIS LNE
CETIAT ensemble, innover et valider
PSA GROUPE
cetim
BEA métrologie
implex LOGICIELS MESURE - QUALITÉ
JRI
comma CONSULTING bienau-delàdelavirgule
Trescal
STIL Precision in focus
SAFRAN
CT2M LE PARTENAIRE À VOTRE MESURE
RENAULT
COLAS ÉCOLIANT MÉTROLOGIE
A3P
LDAR Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche
ZEISS
GROUPE ADP
MÉTRO-logiX
UB UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE
métrique consulting

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

CENTRE DE RESSOURCES

- le Congrès International de Métrologie
- les J'M, Journées nationales de la Mesure
- des Journées Techniques
- des guides et fascicules techniques
- FAQ et bibliothèque en ligne
- l'Annuaire des Prestataires, Fabricants et Editeurs
- des groupes de travail…

19e CONGRÈS INTERNATIONAL DE **MÉTROLOGIE**

CIM2019

24 26 SEPT

PARIS
FRANCE

SHARE
MEASUREMENT
INTELLIGENCE

CFM
L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

www.cim2019.com

info@cfmetrologie.com

Measurement world

OIML

Bureau International des Poids et Mesures

EURAMET

EA EUROPEAN ACCREDITATION

Trescal

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

CREATIVE METROLOGY c'est…

- Un Groupe de Travail sur la métrologie du futur lancé en Mars 2018, piloté par Cosimi Corleto, président du CFM et PDG de Stil Sensors
- Qui s'inscrit dans le contexte Usine du Futur / Industrie 4.0
- Composé des principaux acteurs des domaines de la mesure, du numérique, de l'industrie et des laboratoires (plus de 30 membres)
- L'objectif est d'établir les bases d'une nouvelle métrologie capable de défier les projets liés à l'usine du futur
- S'adresse à l'ensemble des secteurs d'activités industriels
- Il englobe de nombreuses thématiques : les capteurs intelligents, le big data, l'intelligence artificielle, la traçabilité et la sécurité des informations, les évolutions normative …

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

Retours attendes vers l'éco-système

- Améliorer la productivité
- Améliorer la qualité
- Contribuer à la montée en gamme
- Améliorer la traçabilité

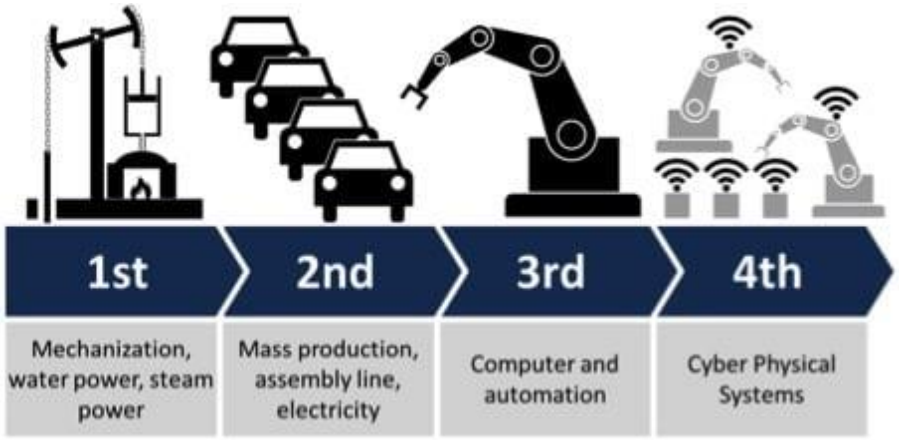
- Réduire les rebus
- Réduire les dépenses d'énergie

- Créer de l'emploi
- Attirer les talents
- Former des spécialistes
- Diffuser les bonnes pratiques

- Donner de la visibilité à la Mesure
- Valoriser l'image de la Mesure
- Créer une filière d'excellence
- Favoriser l'apparition de projets innovants basé sur la mesure

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

Contexte Usine du Futur / Industrie 4.0



1. Machine à vapeur
2. Electricité
3. Electronique / Informatique
4. **Systèmes Cyber-Physique***

* Terme générique désignant l'apparition de nouveaux systèmes hybrides intégrant à la fois des machines, des capteurs, des calculateurs et des moyens de communication.
Ces systèmes peuvent être autonomes et parfois interagir avec l'homme.

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

Un enjeu Global avec des déclinaisons locales

- Usine du futur
  en France
- Industrie 4.0
  en Allemagne
- Smart manufacturing
  en Amérique
- Made in China 2025
  en Chine
- …

Alliance INDUSTRIE DU FUTUR

Industry of the Future
High Value Manufacturing
Smart Industry
Production 2030
Manufacturing 4.0
Produktion der Zukunft
Operational Programme
Fabrica Intelligente

PRODUKTION2030

MADE IN CHINA 2025
Intelligent Manufacturing

fabbrica intelligente

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

Contexte actuellement favorable en France

- Environnement Politico-Economique favorable à l'Industrie :
  - French Fab / Creative Industry
  - French Tech / Creative France
  - Alliance pour l'usine du futur
  - Global Industrie & Usine connecté
  - Projet « L'usine extraordinaire »

- Ecosysteme National :
  - Nombreux Centres de Recherche
  - Enseignement de haut niveau (Universitaire/Grandes Ecoles)
  - Nombreux Savoirfaire (Informatique, Mathematique, Sciences & Techniques, Electronique…)
  - Diversité des secteurs industriels présents en France (Automobile, Aero, Agro, Energie, Batiment, SSII…)
  - Chaine de valeur complète (Recherche>Techno provider> Intégrateurs> End User)
  - Expertise mesure (LNE, CETIAT…)
  - Expertise IOT (CEA grenoble)
  - Expertise production (CETIM…)

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

Vers une nouvelle Usine, plus…

Connectée

- Produits et objets connectés
- Des services qui collaborent dans une chaîne numérique
- Homme augmenté
- Des machines communicantes
- Usines étendues
- Un écosystème en réseau

Créative

- Dans ses produits et usages
- Dans les services qu'elle propose
- Dans les bouquets de solutions qu'elle propose
- Dans ses procédés et matériaux
- Dans ses modes d'organisation et l'utilisation des ressources
- Dans sa prise en compte de la qualité de vie au travail et du facteur humain en général
- Dans sa stratégie et ses business models
- Dans l'intégration des derniers développements R&D

Optimisée

- Produits innovants
- Conception ouverte et collaborative
- Procédés plus efficaces
- Supplychain réactive
- Consommations et rejets réduits
- Utilisation des ressources au plus juste
- Performances économiques optimisées

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

CYBERSÉCURITÉ
> Protection accrue des systèmes de production reliés à Internet
> Produits et technologies à cycle de vie allongé

CLOUD COMPUTING

BIG DATA
> Complexité génératrice de sens
> Créativité
> Production collaborative

CAPTEURS
> Zéro defaut
> Réactivité
> Traçabilité
> Prévision

SYSTEMES AVANCÉS DE PRODUCTION
> Cyber Physical Systems (CPS)
> Commande numérique :
– Automatisation complète
– Systèmes entièrement interconnectés
– Communication de machine à machine

> Fidélisation client
> Flexibilité
> Réponse aux besoins de personnalisation des clients tout en préservant la productivité
> Production à la demande

PERSONNALISATION DE MASSE

FOURNISSEURS

CLIENTS

LOGISTIQUE 4.0
> Supply chain intégré
> Systèmes interconnectés
> Coordination totale

IMPRESSION 3D/ "ADDITIVE MANUFACTURING"
> Réduction des pertes
> Personnalisation de masse
> Création rapide de prototypes

NANO-ELECTRONIQUE
> Produits intelligents à valeur ajoutée
> Différenciation technique
> Connectivité

ROBOT
> Temps réel – autonomie – productivité
> Transparence des reportings (contextualisation, complétude, actions)

VEHICULES AUTONOMES
> Optimisation des flux
> Sécurité accrue
> Coûts plus bas

USINE DU FUTUR A
USINE DU FUTUR B
REGROUPEMENT D'USINES

INTERNET DES OBJETS
> Marquage d'objets
> Communication d'objets-internet via les ondes radios basses fréquences
> Capture de données en temps réel
> Optimisation des stocks
> Réduction des déchets

RESSOURCES FUTURES
VENT
ALTERNATIVES / NON CONVENTIONNELLES
SOLAIRE
GEOTHERMIQUE
> Énergies propres et renouvelables disponibles partout
> Stockage d'énergie
> Matière première alternative

Source : DGE

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

Principaux axes « Usine du futur »

Composites et matériaux
- Multi-matériaux
- Composites grande cadence
- Surfaces fonctionnelles

Digitalisation
- Prototypage virtuel
- Cloud computing
- Big data
- Internet of Things

Fabrication additive
- Frittage laser
- Optimisation des structures
- Personnalisation
- Prototypes

Efficacité énergétique
- Moteurs haut rendement
- Smart Grid
- Optimisation énergétique
- Eco-conception

Transitique & robotique
- Machines intelligentes
- Micro-usines autonomes
- Traçabilité

Place de l'homme
- Cobotique
- Réalité augmentée
- Programmation intuitive

Monitoring et contrôle
- Maintenance préventive
- Capteurs intelligents
- Systèmes cyberphysiques

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

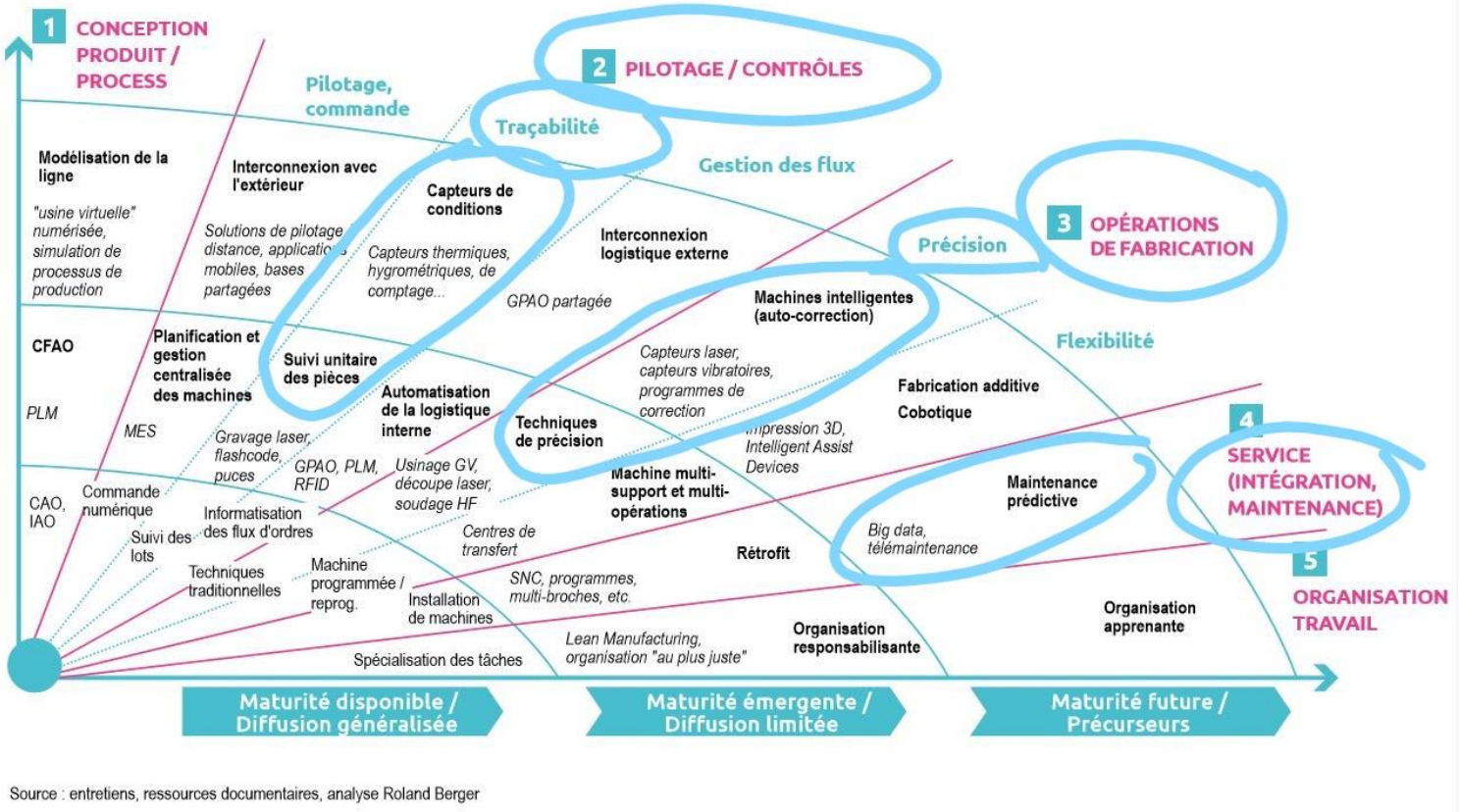
Technologies clefs pour l'usine 4.0

- Fabrication additive (Imprimantes 3D…)
- Robotique collaborative ou mobile (Drone, AGV…)
- Logiciels (ERP, MES…)
- Technologies immersives (Réalité Augmenté, Virtuelle…)
- Cloud (Computing, Stockage, Service, Plateformes…)
- IOT (Objets connectés, capteurs intelligents…)
- IA (Vision, Machine Learning, Deep Learning…)
- Maintenance (Préventive, Prédictive…)
- Big data (Data science, Data analytics…)
- Blockchain
- Cybersecurité
- Traçabilité (NFC, QR code…)

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

La mesure dans l'usine du futur



Source : entretiens, ressources documentaires, analyse Roland Berger

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

Chaine de valeur de la mesure et exemples de nouvelles technologies

Capteurs	Qualité de la donnée	Stockage de la donnée	Valorisation
• IoT	• Etalonnage à distance	• Blockchain	• AI

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

Avancement du GT et Projets 2019

- **Groupe Creative Metrology**
- 35 sociétés participantes au groupe de travail
- 4 workshop déjà effectués en 2018
- Prochains workshop avec des experts en I.A. & Blockchain
- Enquête sur la métrologie du futur en FR et GB
- A venir en 2019: Rédaction d'un livre blanc

Cahiers Métrologie de la revue Contrôles Essai Mesures

CFM L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

GT « CREATIVE METROLOGY »

Exemple de résultats

Quelles sont vos attentes en mesure ?

	1 - faible	2	3	4 - forte	3-4	Priorité
Validité de la mesure	3	6	29	106	135	1
Ressource humaine et compétence	6	19	43	76	119	2
Adaptation à la réglementation	13	19	45	67	112	3
Rapidité/Automatisation	15	24	40	64	104	4
Sécurité/Cryptage/Intégrité - des mesures	20	26	40	58	98	5
Big Data/Data science (stockage et valorisation de la mesure)	20	28	41	55	96	6
Transmission des données internes et externes	13	30	48	53	101	7
Coût	12	41	49	42	91	8
Flexibilité des mesures	8	33	65	38	103	9
Adaptabilité (miniaturisation, environnement...)	20	38	55	31	86	10

Merci pour votre attention

Plus d'informations sur
www.cfmetrologie.com

CFM
L'ASSOCIATION DE LA MESURE INDUSTRIELLE

Modélisation multiphysique DPSM, application à la mécanique des fluides

Dominique Placko[(1)], *Jean-Pierre Barbot*[(1)], Alain Rivollet[(1)], Serge Gourlaouen[(1)(2)]

[(1)]Laboratoire SATIE,
UMR 8029 (CNRS, ENS Paris-Saclay)
[(2)]FTSC

Plan de la présentation

1. Introduction
2. Principes de la méthode DPSM
3. DPSM et mécanique des fluides
4. Applications aux simulateurs de vol
5. Conclusion

1 Introduction

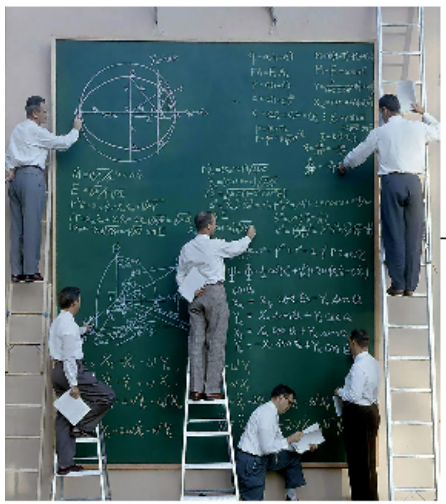
2 Principes de la méthode DPSM

3 DPSM et mécanique des fluides

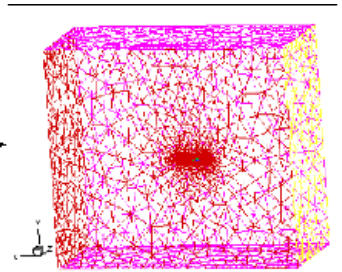
4 Applications aux simulateurs de vol

5 Conclusion

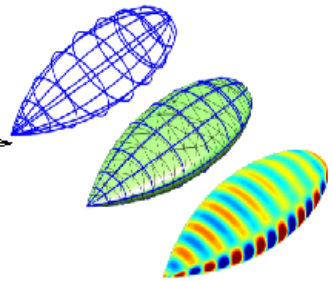
Les techniques de modélisation et de résolution de problèmes physiques ont évoluées...



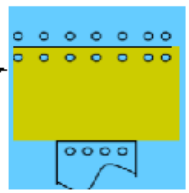
(NASA, 1961)



Finite elements method



Boundary Element Method (BEM)



Distributed Point Source Method (D.P.S.M.)

1 Introduction

2 Principes de la méthode DPSM

3 DPSM et mécanique des fluides

4 Applications aux simulateurs de vol

5 Conclusion

D.P.S.M. pour Distributed Point Source Method [D. Placko, 2007][1]

- C.N.D. electrostatique, electromagnetique, et ultrasonique,
- alternative aux modélisations par éléments finis (gain en temps de calcul ≈1000)

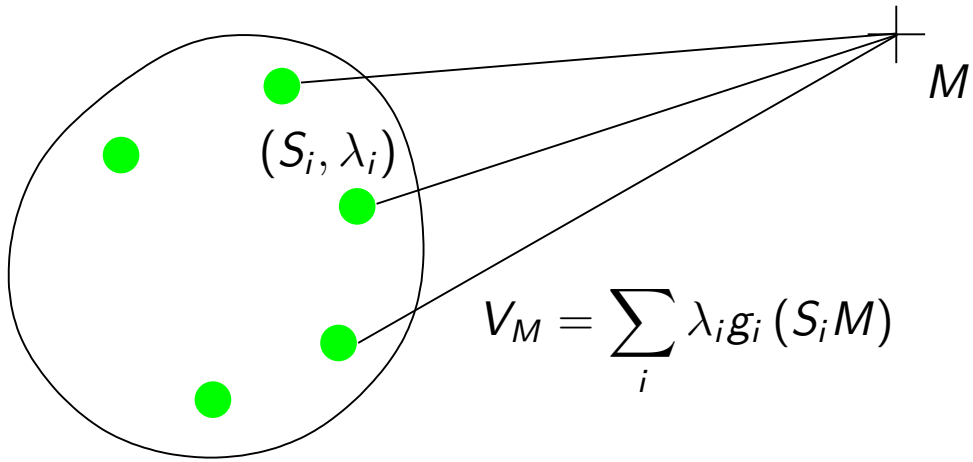
Les caractéristiques principales de la méthode DPSM sont :

- calcul 3D vrai (pas de tronçonnage),
- méthode non itérative,
- méthode précise basée sur l'identification d'interactions physiques (fonctions de Green),
- résultats obtenus sous forme semi-analytique,
- Identification aisée des contributions de chaque élément du problème,

DPSM-Mécanique des fluide, extension de DPSM à la méca. des fluides.

[1] D. Placko, T. Kundu, *DPSM for modeling engineering problems*, Wiley-Interscience, 2007.

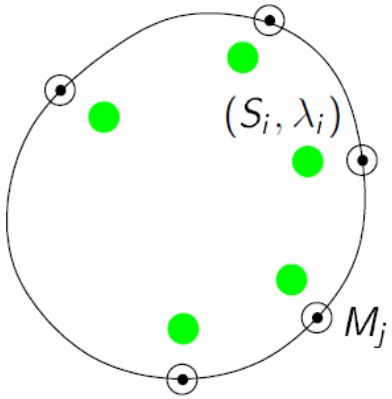
DPSM discrétise les sources actives sous forme d'un ensemble de points sources rayonnants $\{S_i\}$.
Suivant le principe de Huygens (superposition des contributions de chaque source discrète), le champ résultant V_M en un point M d'intérêt est :



- $g_i (S_i M)$ est une fonction de Green,
- λ_i est la contribution de S_i (valeur scalaire ou complexe qui doit être estimée)

Points tests et arrangement des blocs sources [T. Bore *et al*, 2014][2]:

- distribution de points cibles en surface de l'objet : points tests, (M_j)
- calcul de la somme des contributions des sources S_i en chaque M_j



$$V_{M_j} = \sum_i \lambda_i . g\,(S_i M_j)$$

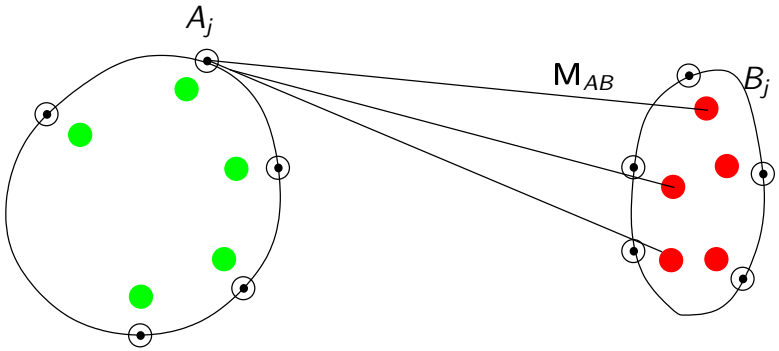
$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} V_{M_1} \\ \vdots \\ V_{M_p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1s} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{p1} & \cdots & g_{ps} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_s \end{pmatrix} = \mathbf{M}\boldsymbol{\lambda}$$

- $\mathbf{M}$ matrice "d'autocouplage" ,
- $V \Rightarrow$ Conditions Limites aux interfaces fixées par l'Utilisateur (CLU), ou Intrinsèques (CLI)

Les CLU/CLI permettent d'estimer les valeurs de $\boldsymbol{\lambda}$ par $\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{M}^{-1} V$

[2] T. Bore, P.-Y. Joubert, D. Placko, *A differential DPSM based modeling applied to eddy current imaging problems*, PIER, vol. 148, pp 209–221, 2014

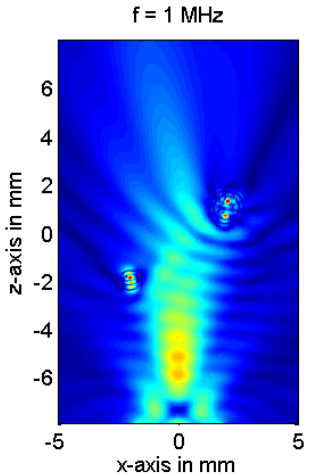
Dans le cas de plusieurs milieux :



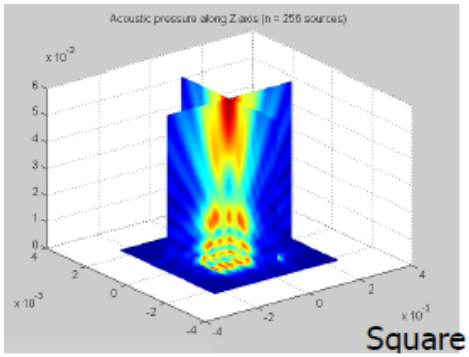
$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_A \\ \mathbf{v}_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{AA} & \mathbf{M}_{AB} \\ \mathbf{M}_{BA} & \mathbf{M}_{BB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{S_A} \\ \boldsymbol{\lambda}_{s_B} \end{pmatrix} = \mathbf{M}\boldsymbol{\lambda}$$

avec $\mathbf{M}_{AB}$ matrice d'intercouplage entre milieux

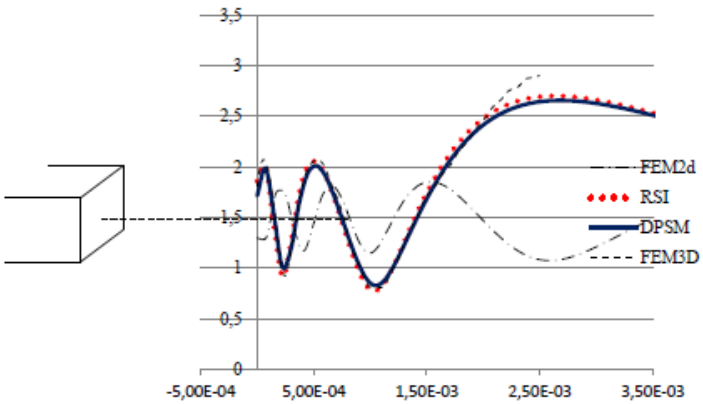
Example 1 : bulles d'air dans de l'eau, transducteur ultrasonique circulaire (R=2 mm)



Exemple 2 : Champ rayonné par un transducteur accoustique :



($f = 1$ MHz, transduc. size $L = 2.4$mm),



($f = 5$ MHz,$L = 1.55$ mm)
Simulation duration: COMSOL (FEM3D) = 35 hours, DPSM = 2 minutes

Du point de vue du traitement du signal :
DPSM : problème inverse (problème inverse et positionnement de sources) de la forme :

$$\mathbf{v} = \mathbf{M}\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{b}$$

- $\mathbf{v}$ regroupe le vecteur conditions aux limites (utilisateurs, intrinsèques aux interfaces, conditions additionnelles, ...)

Du point de vue du traitement du signal :
DPSM : problème inverse (problème inverse et positionnement de sources) de la forme :

$$\mathbf{v} = \mathbf{M}\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{b}$$

- $\mathbf{v}$ regroupe le vecteur conditions aux limites (utilisateurs, intrinsèques aux interfaces, conditions additionnelles, ...)
- $\mathbf{M}$ matrice globale d'interactions (tenseur); dépend des fonctions de Green et du positionnement géométrique des points,

Du point de vue du traitement du signal :
DPSM : problème inverse (problème inverse et positionnement de sources) de la forme :

$$\mathbf{v} = \mathbf{M}\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{b}$$

- $\mathbf{v}$ regroupe le vecteur conditions aux limites (utilisateurs, intrinsèques aux interfaces, conditions additionnelles, ...)
- $\mathbf{M}$ matrice globale d'interactions (tenseur); dépend des fonctions de Green et du positionnement géométrique des points,
- $\boldsymbol{\lambda}$ poids relatifs des sources,

Du point de vue du traitement du signal :
DPSM : problème inverse (problème inverse et positionnement de sources) de la forme :

$$\mathbf{v} = \mathbf{M}\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{b}$$

- $\mathbf{v}$ regroupe le vecteur conditions aux limites (utilisateurs, intrinsèques aux interfaces, conditions additionnelles, ...)
- $\mathbf{M}$ matrice globale d'interactions (tenseur); dépend des fonctions de Green et du positionnement géométrique des points,
- $\boldsymbol{\lambda}$ poids relatifs des sources,
- $\mathbf{b}$ bruit additif.

Deux configurations :

- DPSM en mode “analyse” :
  - **v** regroupe conditions physiques et mathématiques,
  - **b** bruit de calcul,
    Inversion de **M** : inversion directe (si le conditionnement le permet), par pseudo-inverse (fonction du dimensionnement du problème), QR, LU, ...

Deux configurations :

- DPSM en mode “analyse” :
  - **v** regroupe conditions physiques et mathématiques,
  - **b** bruit de calcul,
    Inversion de **M** : inversion directe (si le conditionnement le permet), par pseudo-inverse (fonction du dimensionnement du problème), QR, LU, ...
- DPSM en mode synthèse :
  - **v** regroupe conditions mathématiques mais également des conditions externes (mesures, expérimentations),
  - **b** bruit de mesure et de calcul,
    Inversion de **M** : inversion de type Wiener (plus généralement en suivant approche “régularisée”)

1 Introduction

2 Principes de la méthode DPSM

3 DPSM et mécanique des fluides

4 Applications aux simulateurs de vol

5 Conclusion

Mécanique des fluides : équation de Navier-Stokes, sous l'hypothèse d'un fluide incompressible : $div\left(\vec{V}\right) = \vec{\nabla}.\vec{V} = 0$

- **Fluide irrotational** $\vec{rot}\left(\vec{V}\right) = \vec{\nabla} \times \vec{V} = \vec{0}$ (rotationnel de $\vec{V}$ est nul)

  l'écoulement dérive d'un potentiel scalaire : $\vec{V} = -\vec{\nabla}\theta = -\vec{grad}\,(\theta)$, par analogie avec l'électrostatique :

Electrostatique	Mécanique des Fluides
$\vec{\nabla}.\vec{E} = \Delta P = -\frac{q}{\varepsilon}$	$\vec{\nabla}.\vec{V} = \Delta\theta = 0$

$\vec{V} = \dfrac{\lambda_S.\vec{ST}}{4\pi\varepsilon\left\|\vec{ST}\right\|^3}$ et $P = \dfrac{\lambda_S}{4\pi\varepsilon\left\|\vec{ST}\right\|}$ les sources émettent un champ radial

$\vec{V} = -\vec{\nabla}\theta$ la vitesse $\left[m.s^{-1}\right]$,
θ le potentiel scalaire $\left[m^2.s^{-1}\right]$, $\int \vec{V}.\vec{dl} = \theta$, λ_s in $\left[m^3.s^{-1}\right]$,ρ la densité $\left[Kg.m^{-3}\right]$
$\Rightarrow$ paradoxe de D'Alembert

- **Fluide rotationel** $\vec{rot}\left(\vec{V}\right) = \vec{\nabla} \wedge \vec{V} \neq \vec{0}$

  il y a des sources vortex $\vec{\omega} = \vec{rot}\left(\vec{V}\right) = \vec{\nabla} \wedge \vec{V}$ et l'écoulement dérive d'un potentiel vecteur,
  i.e. $\vec{V} = -\vec{\nabla} \times \vec{A}$ (analogie avec l'électromagnétisme : *Biot et Savart*),
  $\Rightarrow$ les sources émettent un flux transverse (partie rotationnelle)

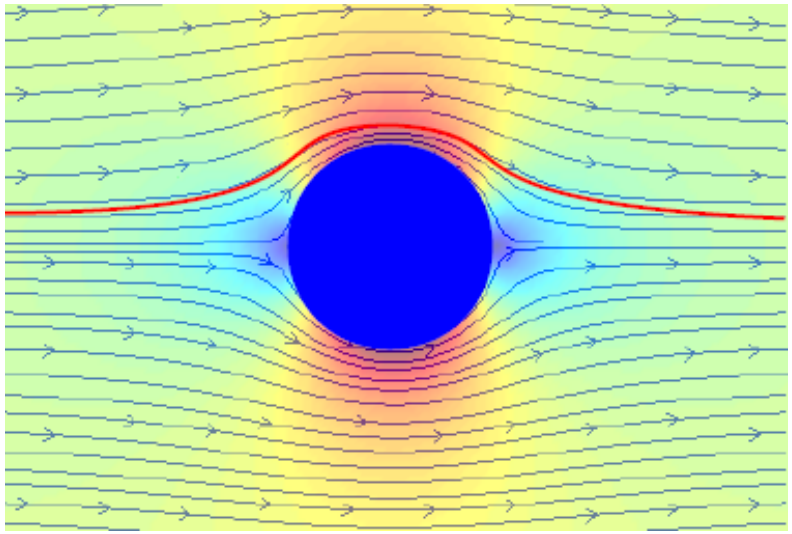
La décomposition de Helmholtz-Hodge est satisfaite : $\vec{V} = -\vec{\nabla}\theta + \vec{\nabla} \wedge \vec{A}$

(équivalent à $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$)

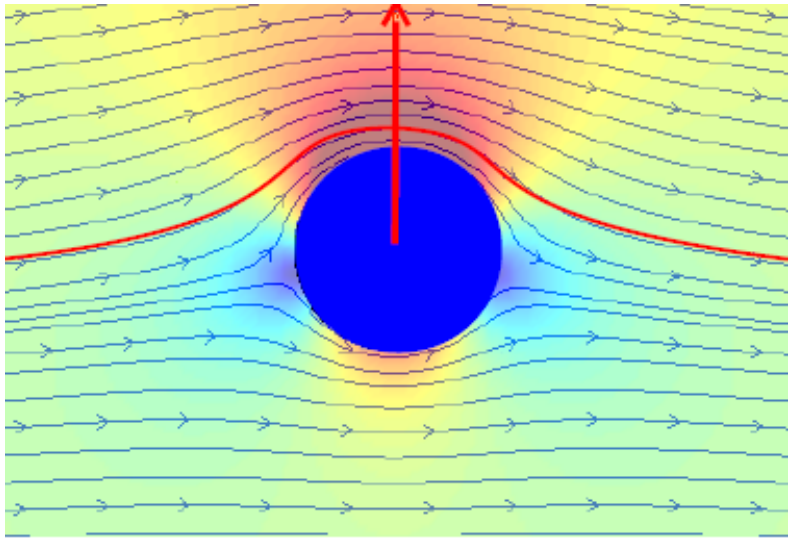
Un cylindre dans un écoulement

- solutions connues (solutions analytiques),
- conditions limites simples à exprimer :
  - entrée et sortie de la souflerie,
  - la composante normale est nulle à la surface,

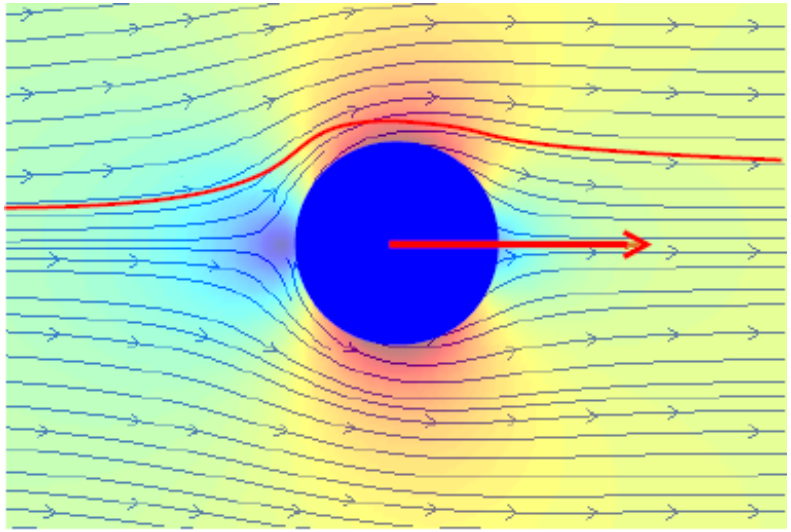
Paradoxe de D'Alembert



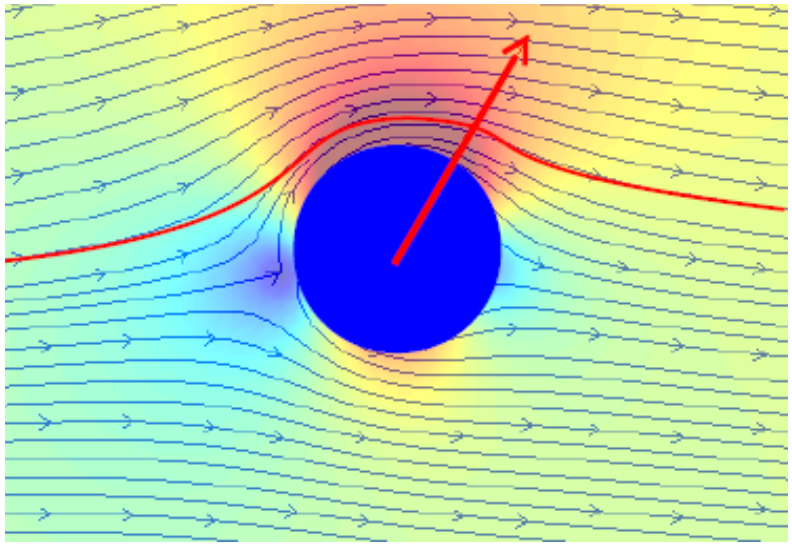
Effet Magnus

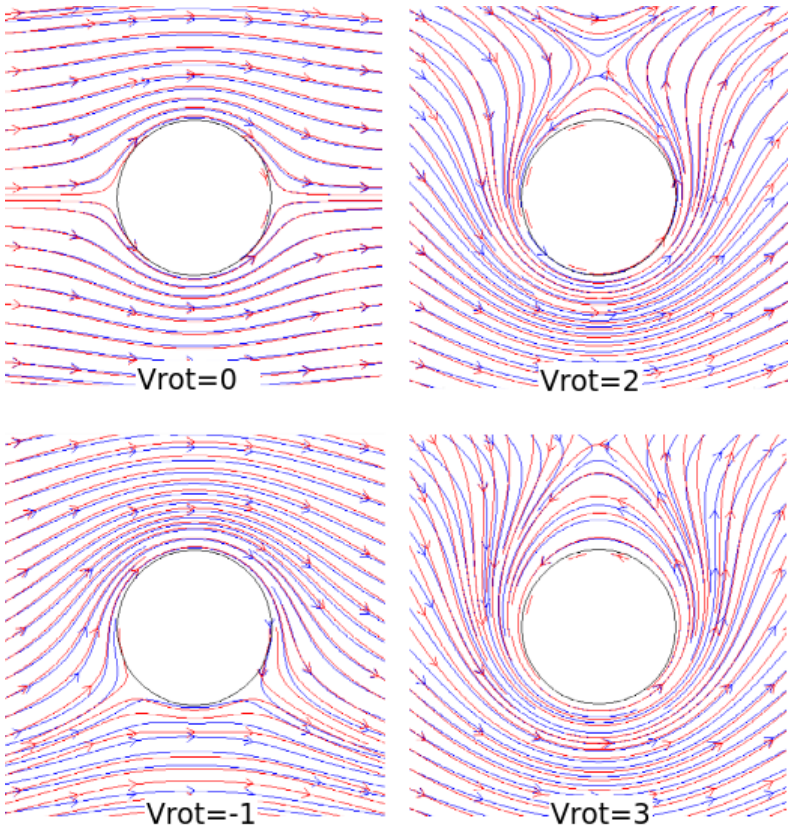


Trainée

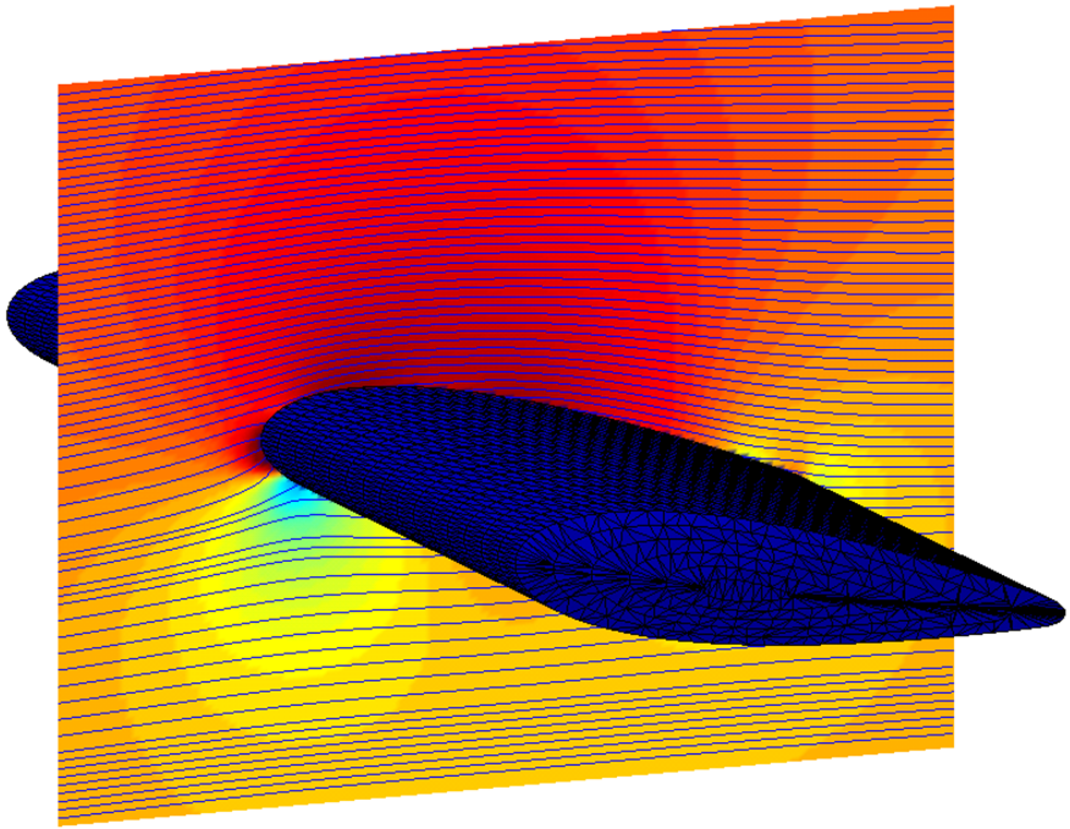


Trainée et effet Magnus



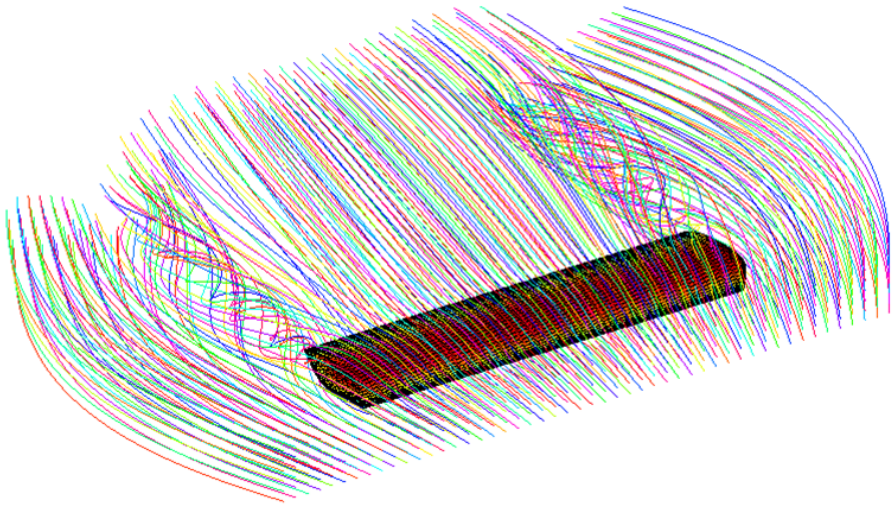


Lignes bleu : DPSM,
Lignes rouge : résultat analytique



NACA 4424, angle of incidence 10 deg., fluid flow
(color represents speed of the fluid)

Aircraft wing simulation (NACA 4424): Wingtip vortices



Résolution trop longue pour application “temps réel”
$\Rightarrow$ introduction d'une approche simplifiée : le Mini-Modèle Vectoriel (MMV)

1 Introduction

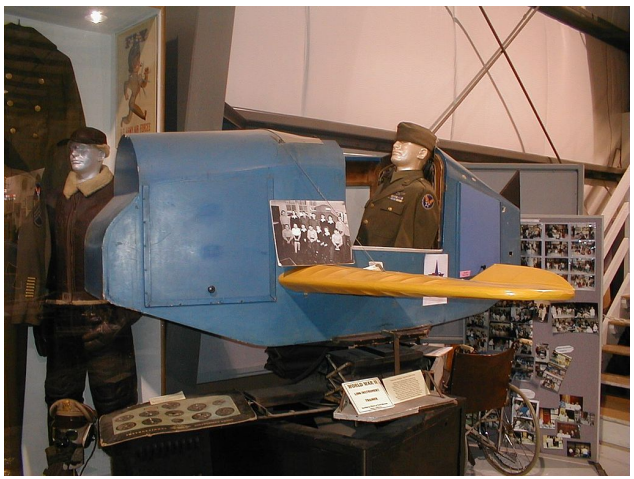
2 Principes de la méthode DPSM

3 DPSM et mécanique des fluides

4 Applications aux simulateurs de vol

5 Conclusion

Les simulateurs de vol, comme les techniques de simulation, ont aussi évolué...



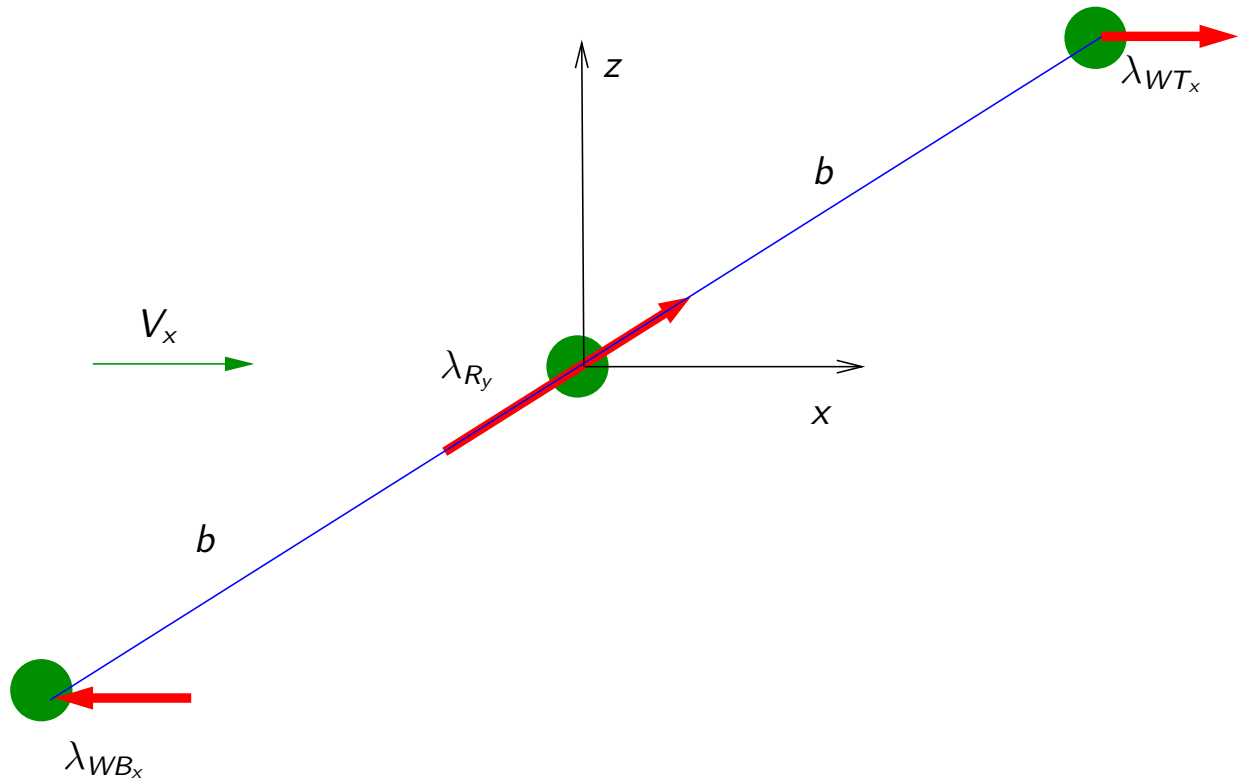
Les simulateur de vol est une contribution majeure :

- pour accroitre la sécurité des vols,
- mais aussi permet des économies substantielles,
- réduit significativement l'impact environnemental de l'avion civile.

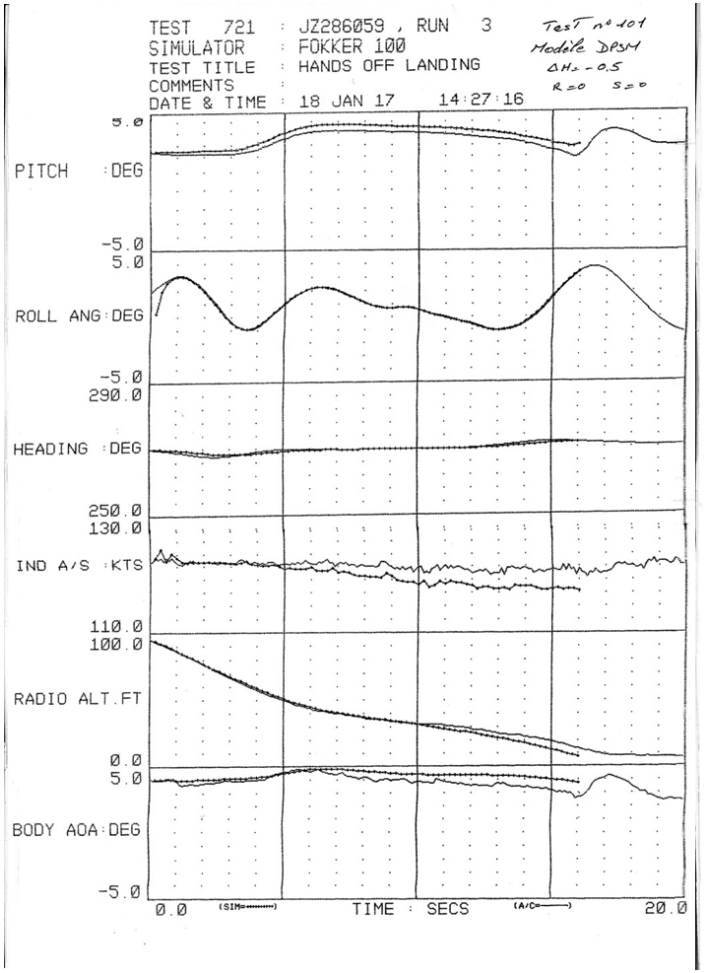
Fokker 100 :

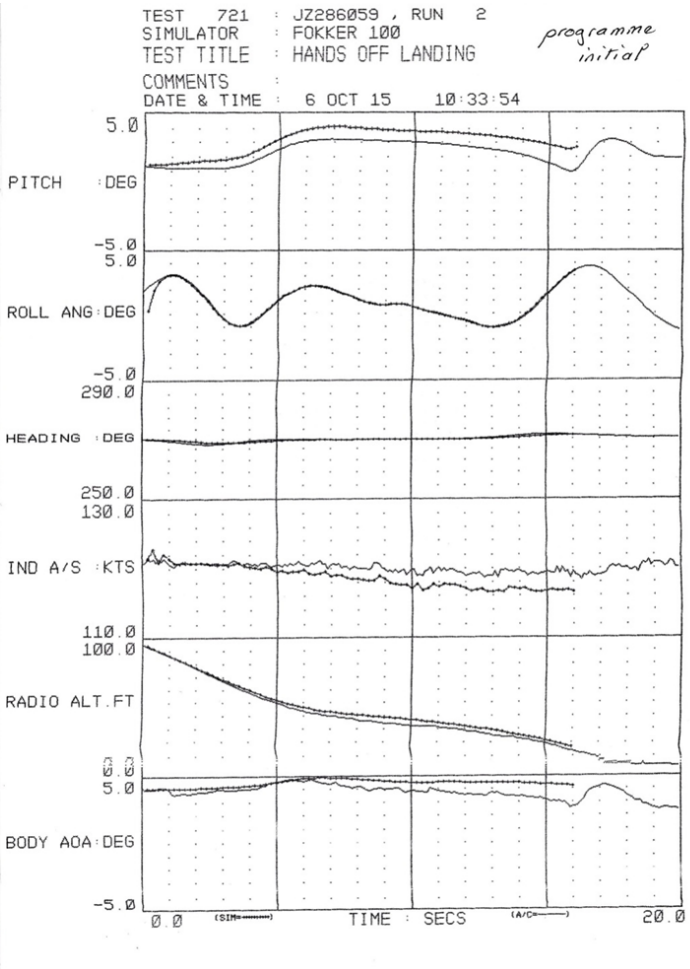
Vision simplifiée d'un aéronef :

- seulement l'aile,
- uniquement une source hybride,
- deux tourbillons marginaux $\Rightarrow$ 2 sources rotationelles



Tests sur un avion isolé : Fokker 100 (test QTG-DPSM-Initial)





1 Introduction

2 Principes de la méthode DPSM

3 DPSM et mécanique des fluides

4 Applications aux simulateurs de vol

5 Conclusion

La méthode DPSM-Mécanique des fluides :

- est une technique full 3D,
- methode non-iterative,
- légère (*i.e.* faible complexité) à implémenter,
- sparse: *i.e.* minimise le critère

$$C = \sum_i \left\| \vec{V}_i - \left(\vec{V}_i\right)_{DPSM} \right\|_{\ell_2}^2 + \lambda . \sum_i \|S_i\|_{\ell_0}$$

- modèle physique et predictif (pas modèle descritif ou statistique)
- $\rightsquigarrow$ peut permettre d'introduire de la physique temps-réel dans un simulateur de vol (expérimentation en cours : plus de source, introduction fléche et diédre, ...)

Identification du canal de propagation radiomobile

Jean-Pierre Barbot, Manh Dat Nguyen

Laboratoire SATIE,
UMR 8029 (CNRS, ENS Paris-Saclay)

Présentation

1. Introduction
2. Modèle
3. Caractérisation du canal de propagation
4. Résultats
5. Conclusion

1 Introduction

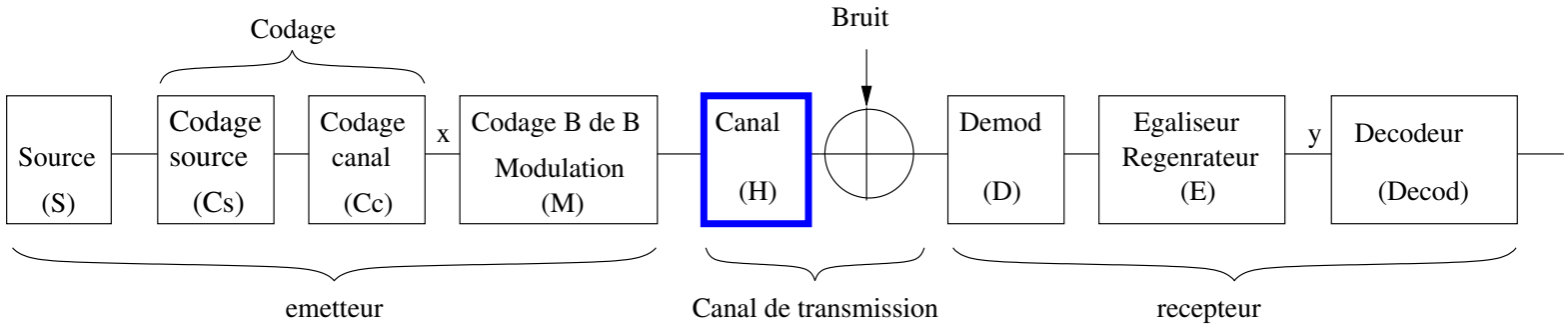
2 Modèle

3 Caractérisation du canal de propagation

4 Résultats

5 Conclusion

La qualité de fonctionnement dépend du canal de propagation :



Nécessité de caractériser le canal de propagation :

- dimensionnement des systèmes,
- pendant le fonctionnement (égalisation $\equiv$ filtrage inverse),
- synchronisation,
- *géolocalisation, navigation Indoor, encryptage dynamique (wireless)*,
- ...

1 Introduction

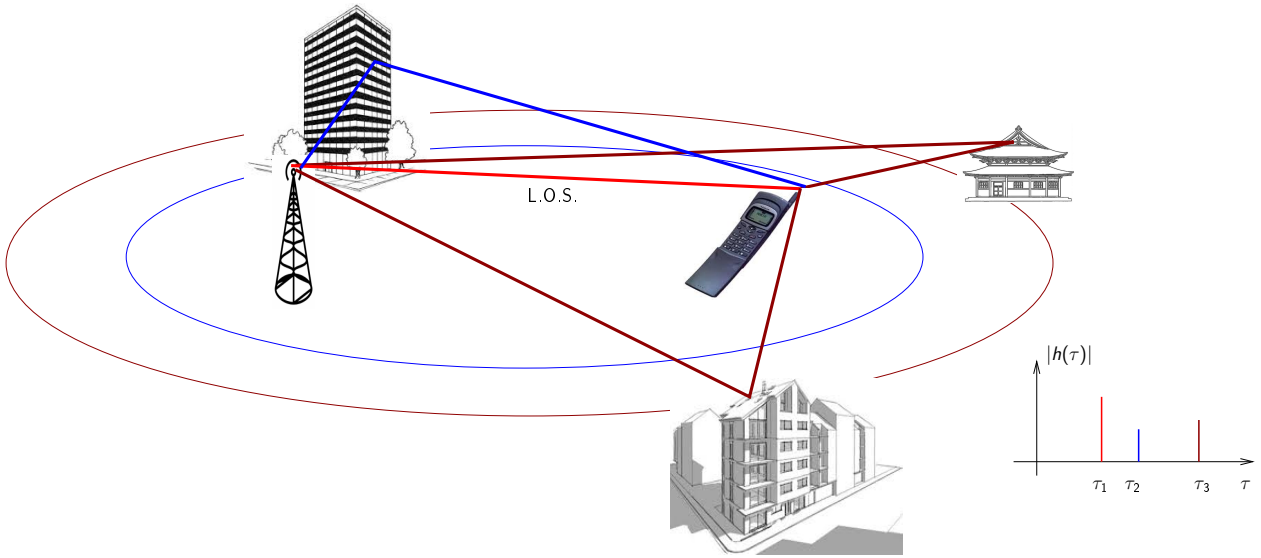
2 Modèle

3 Caractérisation du canal de propagation

4 Résultats

5 Conclusion

Canal radiomobile et ellipsoïde de Fresnel



Bande UHF $[300\ \mathrm{MHz},\ 3\ \mathrm{GHz}] \Rightarrow$ canal multi-trajets,

- LOS (Line Of Sight) : trajet en visibilité (atténuation),
- NLOS (Non Line Of Sight) : non visibilité (atténuations, pertes par réflexion, diffraction, effet Doppler)

Effets linéaires $\rightsquigarrow$ système linéaire mais variant dans le temps

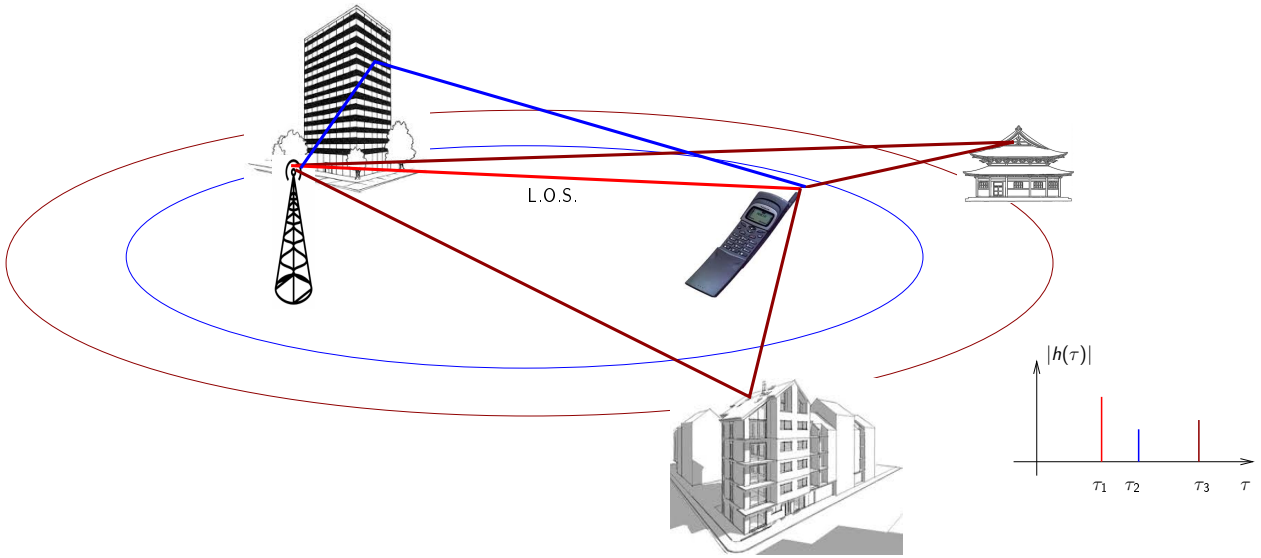
Système linéaire et moyennant l'hypothèse d'invariance temporelle (ou locale),
le canal est entièrement caractérisé par sa réponse impulsionnelle complexe (ou par sa fonction de transfert)

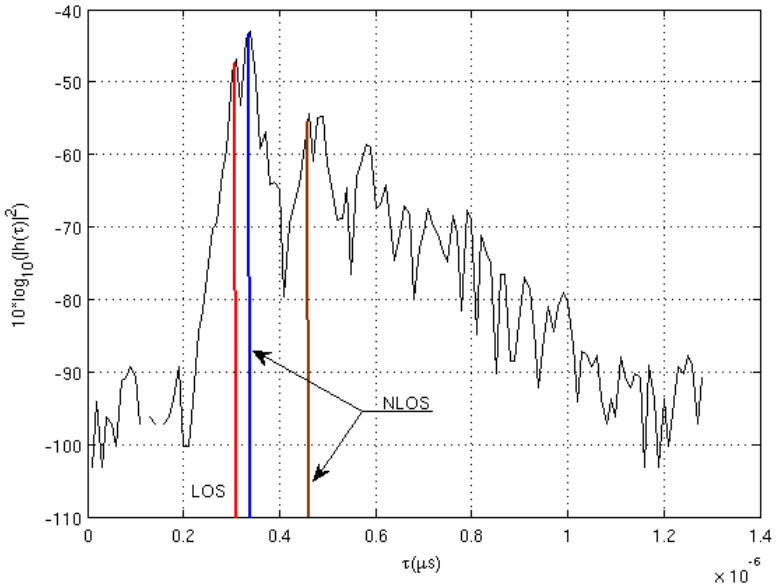
$$\begin{aligned} y(t) &= h(t) \otimes s(t) + n(t) \\ &= h_c(t) \otimes h_{inst}(t) \otimes s(t) + n(t) \\ &= h_c(t) \otimes e(t) + n(t) \end{aligned} \tag{1}$$

où

$$\begin{cases} s(t) & \text{signal d'entrée du système,} \\ e(t) & \text{signal propagé dans le canal,} \\ y(t) & \text{signal en sortie du système,} \\ \otimes & \text{produit de convolution,} \\ h_c(t),\ h_{inst}(t) & \text{réponses impulsionnelles (canal, système de mesure)} \\ h(t) & h(t) = h_c \otimes h_{inst}(t) \\ n(t) & \text{le bruit de mesure.} \end{cases}$$

Canal radiomobile et ellipsoïde de Fresnel





Sous forme discrétisée, le système d'équations (1) devient :

$$y(k) = \sum_{m=0}^{M-1} s(k-m)\, h(m) + n(k) \quad k = 0, \cdots, N-1 \tag{2}$$

sous forme matricielle :

$$\mathbf{y} = \mathbf{Sh} + \mathbf{n} \tag{3}$$

avec

- $\mathbf{y} = (y(0), \cdots, y(k), \cdots, y(N-1))^T$ le vecteur d'observation (mesuré) $N \times 1$,
- $\mathbf{S}$ la représentation sous forme matricielle du signal d'entrée $N \times M$, $\mathbf{S}_{ij} = s(i-j)$,
- $\mathbf{h}$ vecteur contenant la réponse impulsionnelle complexe $M \times 1$
- $\mathbf{Sh}$ le vecteur contenant la sortie du système linéaire (non bruitée),
- $\mathbf{n} = (n(0), \cdots, n(N-1))^T$ le vecteur de bruit.

1 Introduction

2 Modèle

3 Caractérisation du canal de propagation

4 Résultats

5 Conclusion

Identification :

$$\begin{aligned} y(t) &= h(t) \otimes s(t) + n(t) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)\, s(t-\tau) d\tau + n(t) \end{aligned} \tag{4}$$

Identification :
- injecter $s(t)$ connu,
- et estimer $h(t)$ à partir de la mesure $y(t)$

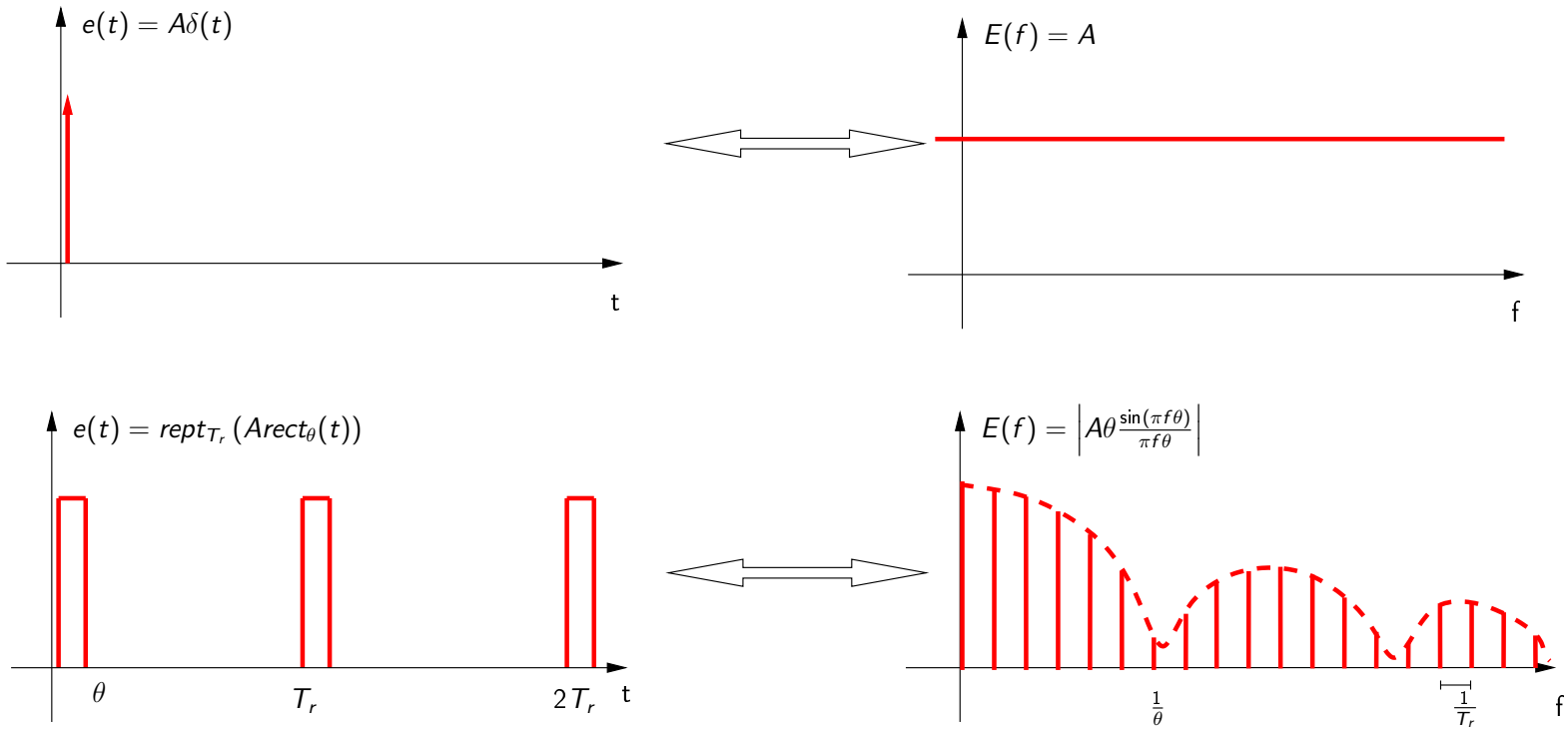
Techniques d'identification classiques :

- méthode directe (RADAR à impulsion),
- balayage en fréquence (RADAR FMCW),
- identification par corrélation (filtre adapté),

et des techniques d'estimation (déterministes ou Bayesiennes)

1) Identification directe

$$\begin{cases} y(t,x) &= h_c(t,x) \otimes e(t) + b(t) \\ e(t) &= A\delta(t) \\ y(t) &= h_c(t) + b(t) \end{cases}$$



exemple : RADAR à impulsion, ...

2) Mesure de la fonction de transfert

$$\begin{cases} e(t) &= \sin(2\pi f_0 t) \\ Y(f) &= H_c(f) \times \delta(f - f_0) \\ Y(f_0) &= H_c(f_0) \end{cases}$$

exemple : RADAR FMCW, Analyseur de spectre à balayage, Analyseur de réseau vectoriel, ...

3) Identification par corrélation

Rappel : corrélation de signaux à puissance moyenne finie (énergie infinie)

$$\begin{aligned} \varphi_{xy}(\tau) &= \langle x^*, y_\tau \rangle \\ &= \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^*(t) y(t+\tau) dt \end{aligned}$$

$$\varphi_{xx}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^*(t)x(t+\tau)dt$$

Application à l'identification

$$\begin{cases} y(t,x) &= h_c(t,x) \otimes e(t) + b(t) \\ \varphi_{ey}(\tau) &= h_c(\tau,x) \otimes \varphi_{ee}(\tau) + \varphi_{eb}(\tau) \end{cases}$$

Relation corrélation/produit de convolution

$$\varphi_{ey}(\tau) = e^*(-\tau) \otimes y(\tau)$$

d'où

$$\begin{aligned} \varphi_{ey}(\tau) &= h_c(\tau,x) \otimes \varphi_{ee}(\tau) + \varphi_{eb}(\tau) \\ &= h_c(\tau,x) \otimes \underbrace{[e^*(-\tau) \otimes e(\tau)]}_{\text{Filtre adapté}} + \varphi_{eb}(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

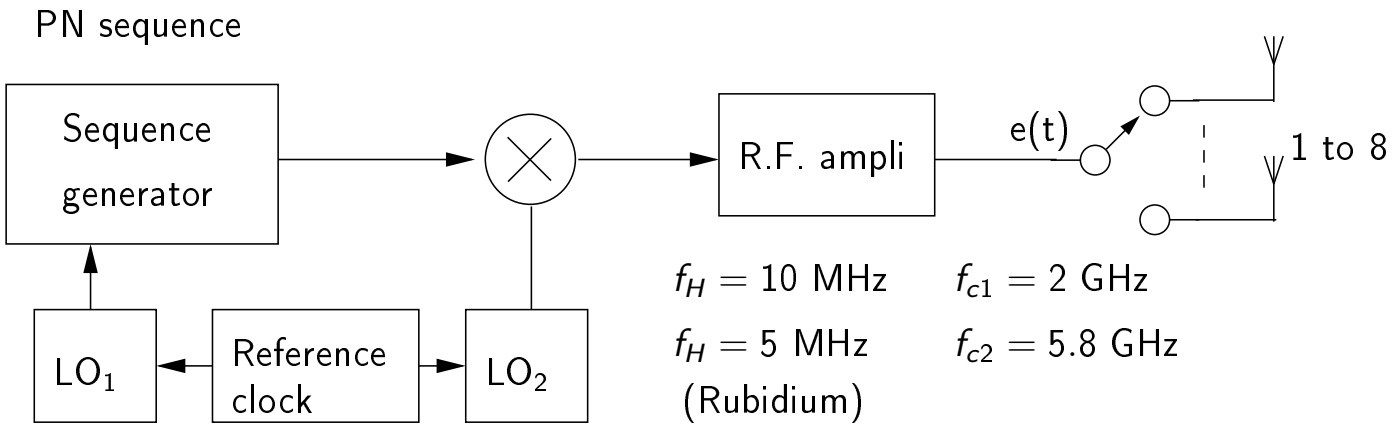
Si $\varphi_{ee}(\tau) = \delta(\tau)$:

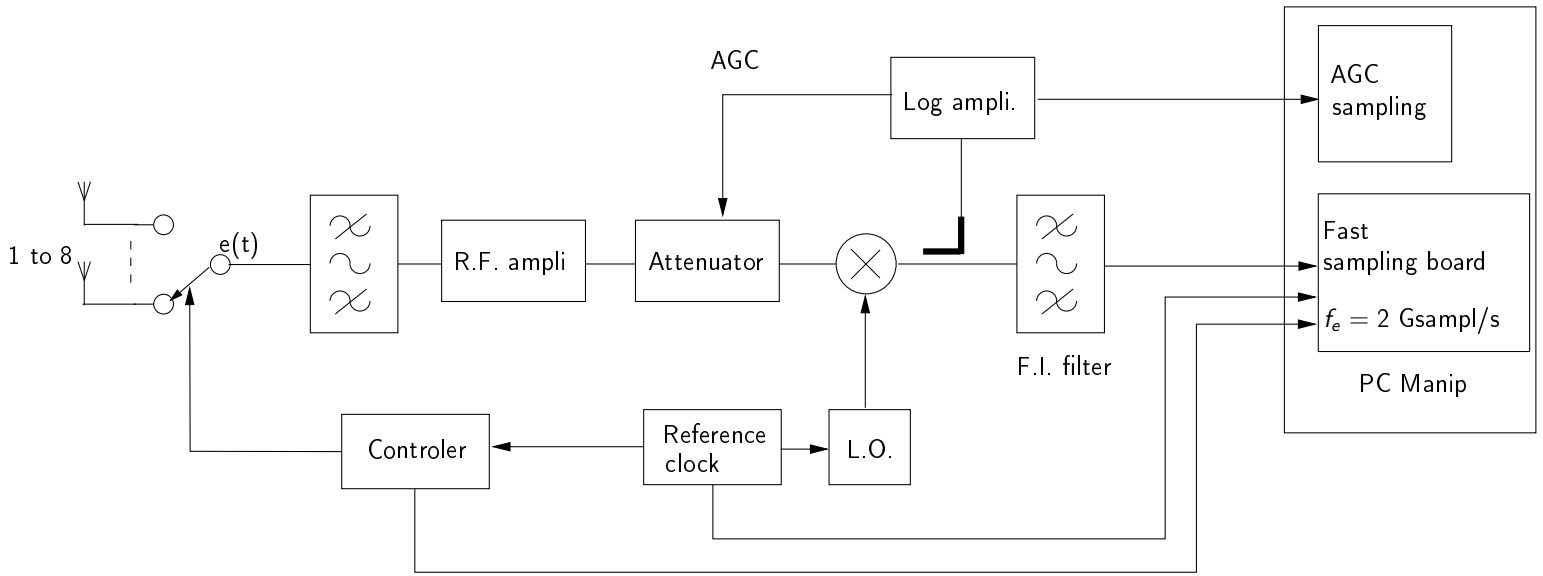
- exemple : cas d'un bruit blanc (thermique)
- (5) semblable à l'identification directe,
- $\varphi_{ey}(\tau) = h_c(\tau, x) + \varphi_{eb}(\tau)$
- $\varphi_{eb}(\tau) \searrow$ car signal et bruit non-corrélés (gain de traitement)

Problème : temps de mesure infini...
Solution : utiliser un signal périodique

$$\varphi_{ey}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e^*(t) y(t+\tau) dt$$

$\Rightarrow$ Séquences PN *code pseudo-aléatoire à longueur maximale*
Exemples : GPS, GSM, ...


PN sequence
Sequence generator
LO1
Reference clock
LO2
R.F. ampli
e(t)
1 to 8
$f_H = 10$ MHz
$f_H = 5$ MHz
(Rubidium)
$f_{c1} = 2$ GHz
$f_{c2} = 5.8$ GHz



[1] Jean-Pierre Barbot, "*Propagation radioelectrique avec les mobiles pour les communications personnelles à l'interieur des batimens dans la bande 1-3 GHz*", Thèse de Doctorat, juin 1995.

Estimation (cadre déterministe)

L'identification au sens des moindres carrés, pour laquelle la fonction à minimiser s'écrit :

$$J_1 = \|\mathbf{y} - \mathbf{S}\mathbf{h}\|_2^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{S}\mathbf{h})^H (\mathbf{y} - \mathbf{S}\mathbf{h}) \tag{6}$$

où $\|.\|_2^2$ est la norme ℓ^2.
La solution de ce problème d'estimation, $\hat{\mathbf{h}}_{LS}$, s'écrit :

$$\hat{\mathbf{h}}_{LS} = \left(\mathbf{S}^H\mathbf{S}\right)^{-1}\mathbf{S}^H\mathbf{y} = \hat{\mathbf{h}}_{MV} \tag{7}$$

Sous l'hypothèse d'un Bruit Additif Blanc Gaussien (BABG), $\hat{\mathbf{h}}_{LS}$ est également l'estimateur au sens du maximum de vraisemblance $\hat{\mathbf{h}}_{MV}$.

Estimation (cadre Bayésien)

Minimisation de l'erreur quadratique et contrainte de linéarité ⇒Filtre de Wiener ou filtre LMMSE

$$\hat{\mathbf{h}}_{Wiener} = \left(\mathbf{S}^H\mathbf{S} + \mathbf{R}_{hh}^{-1}\mathbf{R}_{nn}\right)^{-1}\mathbf{S}^H\mathbf{y} \tag{8}$$

nécessite des *a priori* forts : $\mathbf{R}_{hh}$, $\mathbf{R}_{nn}$

Introduction d'*a priori* (solutions régularisées)

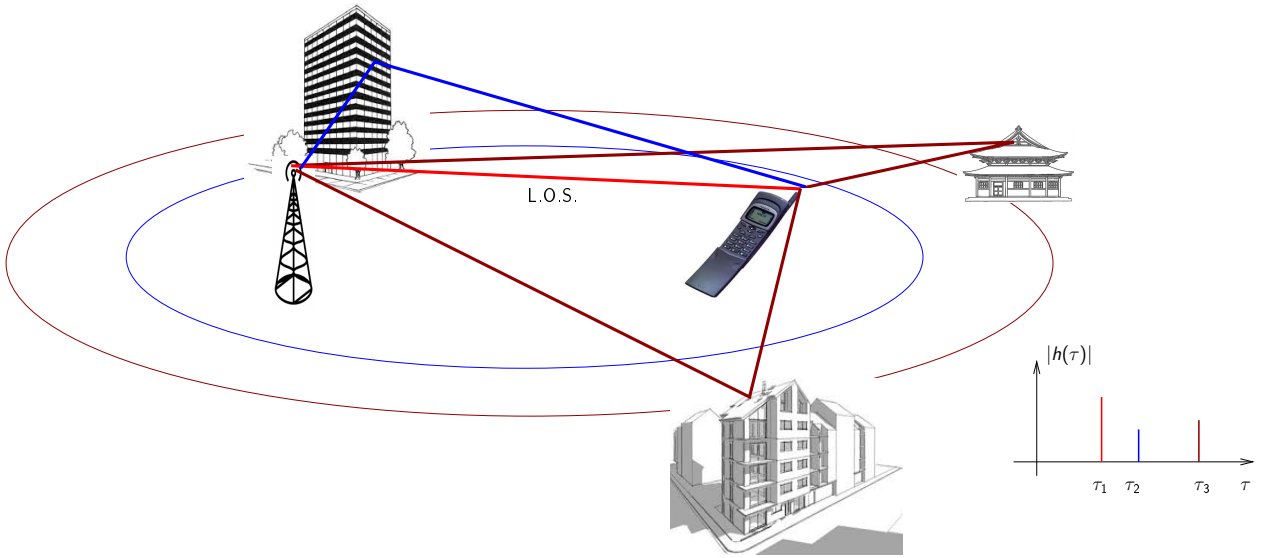
Equation (4) est un problème mal posé (équation de Fredholm de 1$^{\text{ère}}$ espèce),
$\rightsquigarrow$ introduction de contraintes supplémantaires $\mathbf{C}$ (*a priori*) sur le type de solution recherché.

$$\text{avec } \hat{\mathbf{h}}_{Régularisée} = \arg\min_{h} \left(\|\mathbf{y} - \mathbf{Sh}\|_2^2 + \alpha \underbrace{(\mathbf{Ch})^H (\mathbf{Ch})}_{\text{Norme } \ell^2} \right) \quad \alpha > 0 \qquad (9)$$

$\mathbf{C}$ permet d'introduire des *a priori* sur la solution recherchée : douceur (Philips, Tikhonov, Twomey), norme, ...

La réponse impulsionnelle du canal de propagation est *a priori* "sparse" :

Canal radiomobile et ellipsoïde de Fresnel



$$h(t) = \sum_{i=0}^{I-1} h_i \delta(t - \tau_i)$$

- **h** vecteur "réponse impulsionnelle" est sparse ($M \times 1$ et $I \ll M$)

Example : 6 trajets pour le modèle GSM, 8 trajets pour le modèle 3 GPP (EVA)

a priori de parcimonie

La contrainte de parcimonie s'introduit dans l'équation de régularisation (9) sous la forme :

$$\hat{\mathbf{h}} = \underset{\mathbf{h}\in\mathbb{C}^M}{\arg\min} \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{Sh} - \mathbf{x}\|_2^2 + \lambda \underbrace{\|\mathbf{h}\|_0}_{\text{Norme } \ell^0} \right\} \tag{10}$$

$$\|\mathbf{h}\|_0 \triangleq \sum_{m=0}^{M-1} |h_m|_0 \quad \text{avec} \quad |x|_0 \triangleq \begin{cases} 1 & \text{si } x \neq 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \end{cases}$$

$\|.\|_0$ norme ℓ^0 non convexe $\Rightarrow$ problèmes NP-Hard.

Mise en œuvre :

- Utilisation d'une norme ℓ^1 :
  BP (Basis Pursuit, Basis Pursuit DeNoising) également connue sous le nom LASSO

Mise en œuvre :

- Utilisation d'une norme ℓ^1 :
  BP (Basis Pursuit, Basis Pursuit DeNoising) également connue sous le nom LASSO
- Utilisation d'algorithmes "greedy" :
  OMP (Orthogonal Matching Pursuit) et OLS

Mise en œuvre :

- Utilisation d'une norme ℓ^1 :
  BP (Basis Pursuit, Basis Pursuit DeNoising) également connue sous le nom LASSO
- Utilisation d'algorithmes "greedy" :
  OMP (Orthogonal Matching Pursuit) et OLS
- Cas non-RIP :
  pénalisation ℓ^0 IHT (Iterative Hard Thresholding), CELO (Continuous Exact ℓ^0) [2], SL0 Smoothed ℓ_0 norm [3]

[2] E. Soubies, L. Blanc-Féraud, and G. Aubert, "A Continuous Exact ℓ^0 Penalty (CEL0) for Least Squares Regularized Problem," SIAM Journal on Imaging Sciences, vol. 8, no. 3, pp. 1607–1639, 2015.

[3] R. Niazadeh, Sina Hamidi Ghalehjegh, M. Babaie-Zadeh, C. Jutten, "ISI sparse channel estimation based on SL0 and its application in ML sequence-by-sequence equalization," Signal Processing 92 (2012) 1875–1885, Elsevier.

$$\hat{\mathbf{h}} = \underset{\mathbf{h}\in\mathbb{C}^M}{\arg\min} \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{S}\mathbf{h} - \mathbf{x}\|_2^2 + \Phi_{\mathrm{CELO}}(\mathbf{h}) \right\} \tag{11}$$

$$\text{avec } \Phi_{\mathrm{CELO}}(\mathbf{h}) = \lambda - \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\|\mathbf{S}_{.m}\|^2}{2} \left(|h_m| - \frac{\sqrt{2\lambda}}{\|\mathbf{S}_{.m}\|} \right)^2 \mathbb{1}_{\{|h_m| \leq \frac{\sqrt{2\lambda}}{\|\mathbf{S}_{.m}\|}\}}$$

[3] E. Soubies, L. Blanc-Féraud, and G. Aubert, "A Continuous Exact ℓ^0 Penalty (CEL0) for Least Squares Regularized Problem," *SIAM Journal on Imaging Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 1607–1639, 2015.

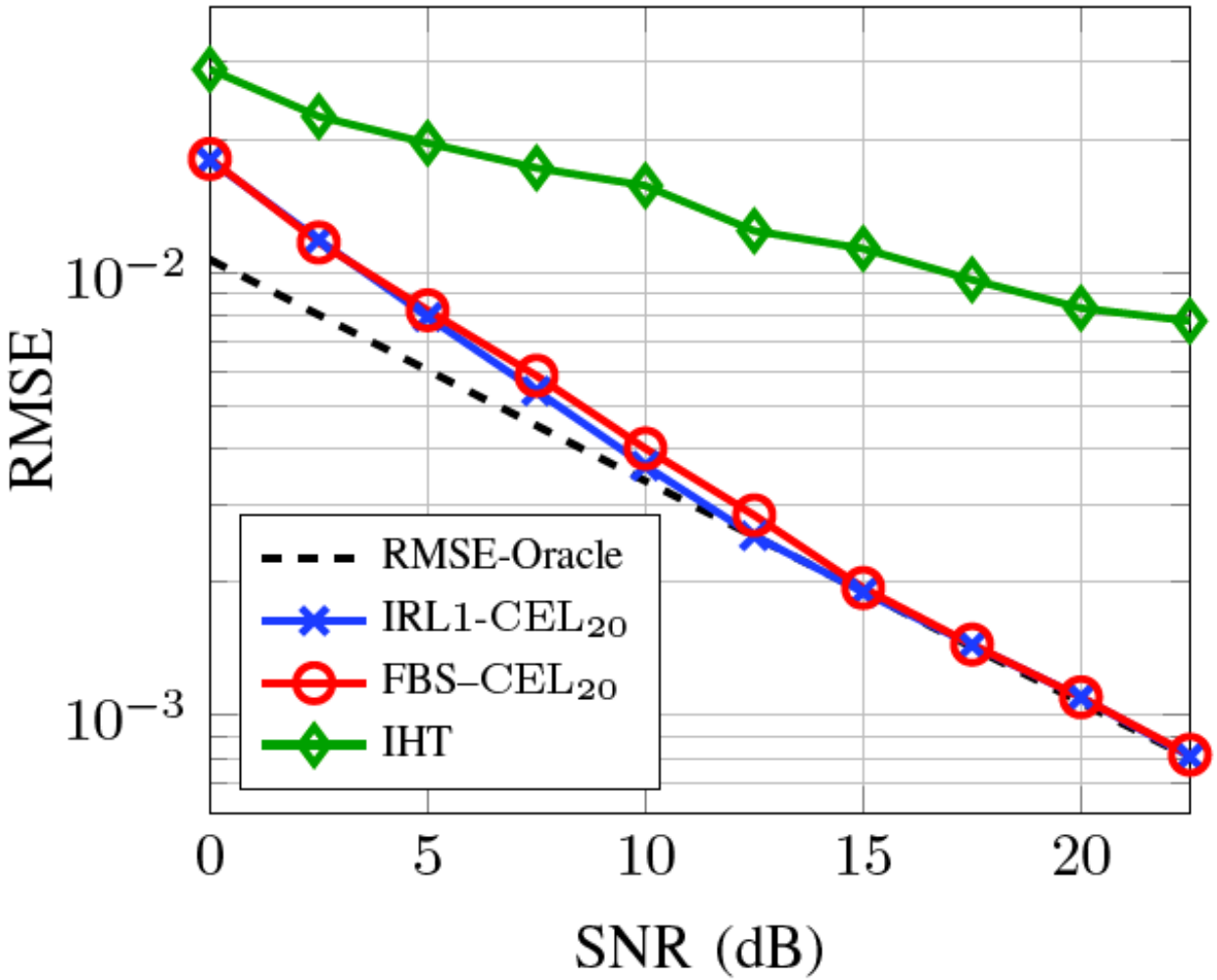
1 Introduction

2 Modèle

3 Caractérisation du canal de propagation

4 Résultats

5 Conclusion



[4] Adilson Chinatto, Emmanuel Soubies, Cynthia Junqueira, João M. T. Romano, Pascal Larzabal, Jean-Pierre Barbot and Laure Blanc-Féraud, *"L0-optimization for Channel and DOA sparse estimation"*. Proc. CAMSAP, 2015.

1 Introduction

2 Modèle

3 Caractérisation du canal de propagation

4 Résultats

5 Conclusion

- Identification parcimonieuse d'un vecteur réponse impulsionnelle (SMV),

- Identification parcimonieuse d'un vecteur réponse impulsionnelle (SMV),
- Extension MMV,

- Identification parcimonieuse d'un vecteur réponse impulsionnelle (SMV),
- Extension MMV,
- Application à l'encryptage dynamique (wireless), radio-navigation Indoor, Modélisation propagation (DPSM).

Laboratoire ESYCOM
LABORATOIRE ÉLECTRONIQUE, SYSTÈMES DE COMMUNICATION ET MICROSYSTÈMES
Sous la co-tutelle de :
CNAM
ESIEE PARIS
UPEM • UNIVERSITÉ PARIS-EST MARNE-LA-VALLÉE
SATIE

Puce microfluidique instrumentée pour la caractérisation HyperFréquence de fluides par spectroscopie diélectrique

H. Mariam, P. Poulichet, H. Takhedmit, L. Rousseau, B. Lepioufle, A. El Fellahi E. Richalot et O. Francais

C2I 2019
8ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation
Talence du 28 au 30 Janvier 2019

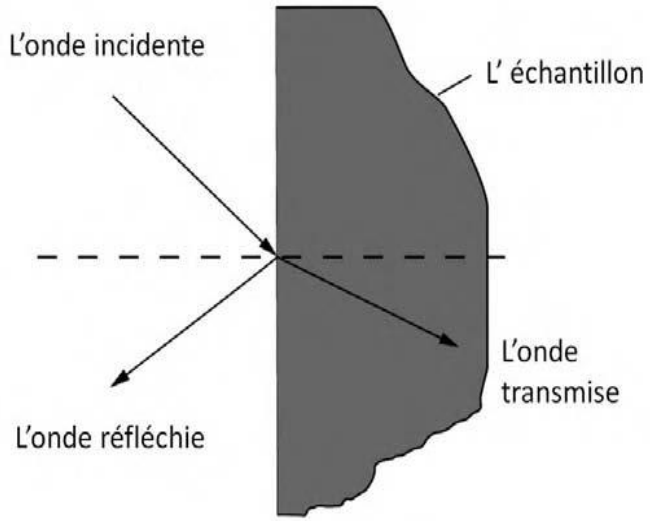
UPEM UNIVERSITÉ PARIS-EST MARNE-LA-VALLÉE
le cnam
ESIEE PARIS
ENS CACHAN

Plan de présentation

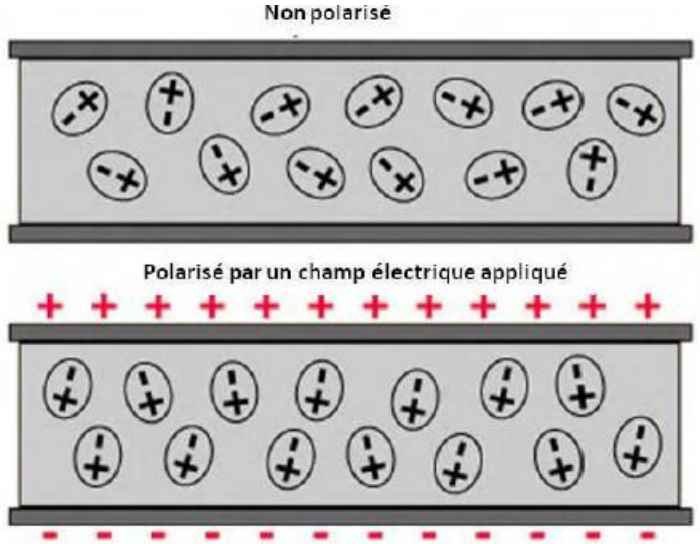
- Introduction
- Principe de mesure des propriétés HF d'un matériau
- Présentation des résultats: simulations et mesures
- Conclusion et perspectives

Introduction

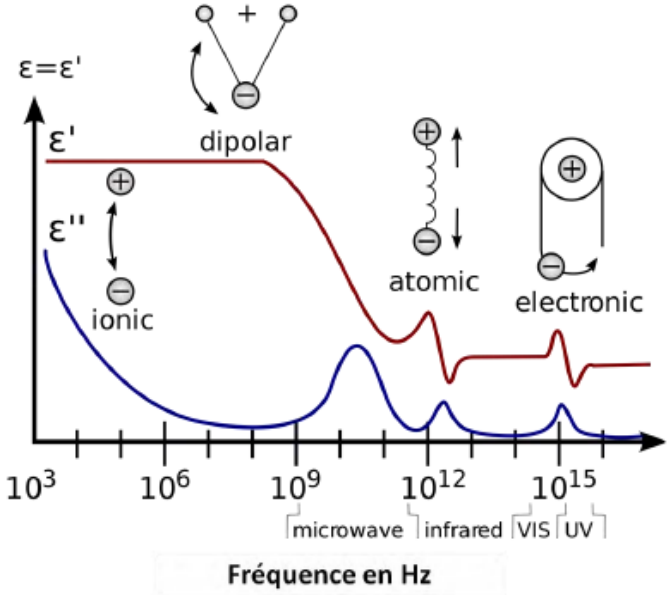
- Permittivité complexe et comportement fréquentiel



Mécanisme de la mesure en réflexion et en transmission



Polarisation de milieu diélectrique par un champs électrique



Permittivité relative complexe en fonction de la fréquence

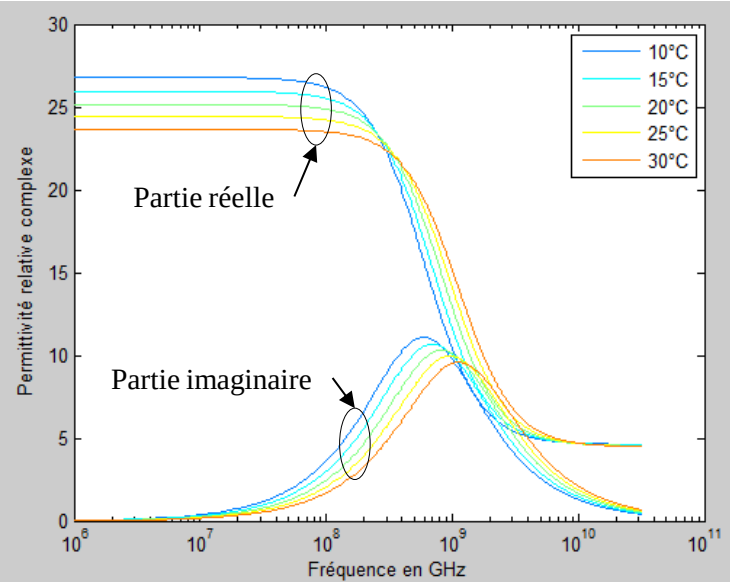
- Permittivité relative complexe $\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)$
- Relaxation de Debye [1,2] $\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \dfrac{\Delta\varepsilon}{1 + \mathrm{j}.\omega.\tau}$
- Temps de relaxation: $\tau = \dfrac{1}{2\pi f_R}$

[1] P. Debye, Ver. Deut. Phys. Gesell. 15, 777; reprinted 1954 in collected papers of Peter J.W. Debye Interscience, New York. 1913.

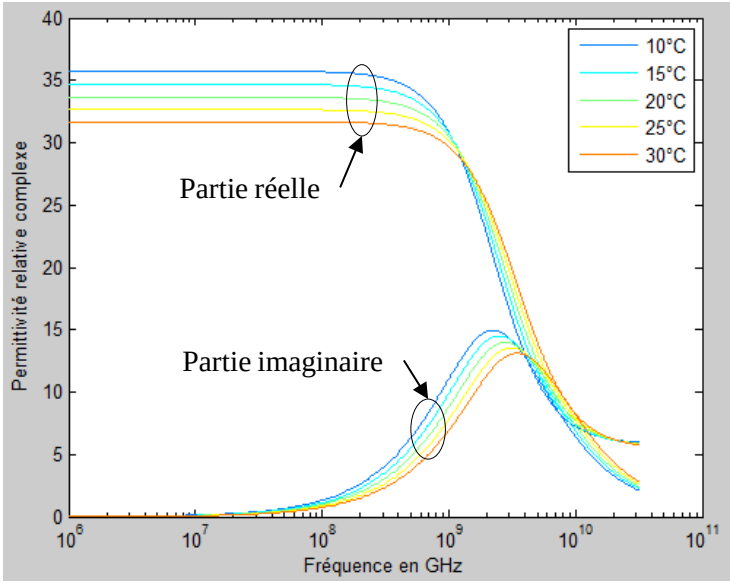
[2] P. Debye, "Polar molecules.," J. Soc. Chem. Ind., vol. 48, no. 43, pp. 1036–1037, Oct. 1929.

Introduction

- Paramètres de relaxation diélectrique pour différents liquides à différentes températures [3-5].
  - Tracés sur MATLAB à partir du modèle de Debye du méthanol et de l'éthanol



Valeurs de Debye de l'éthanol



Valeurs de Debye du méthanol

Liquid	ε_s	ε_∞	τ (ps)
Hexane	1.89	1.89	5.8
Chloroform	4.7	2.5	7.96
Ethanol	24.3	4.2	163
Methanol	32.5	5.6	51.5
Water	78.36	5.16	8.27

Autre liquides (T = 25°C)

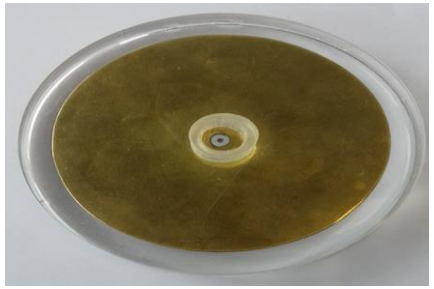
[3] A. P. Gregory and R. N. Clarke, "*Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz," National Physical Laboratory ,NPL* Report MAT 23, Middlesex, 2012.

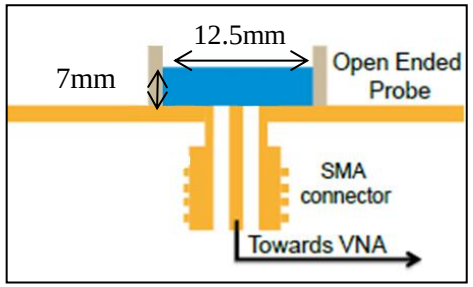
[4] F. Buckley and A. A. Maryott, "Tables of dielectric dispersion data for pure liquids and dilute solutions," *Nat. Bureau Standards Circular, vol. 589, p. 6, Nov.* 1958.

[5] U. Kaatze, "Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature," *J. Chem. Eng. Data, vol. 34, no. 4, pp. 371–374, Oct. 1989.*

Principe de mesure des propriétés d'un matériau en HF

- Système de mesure « macro »



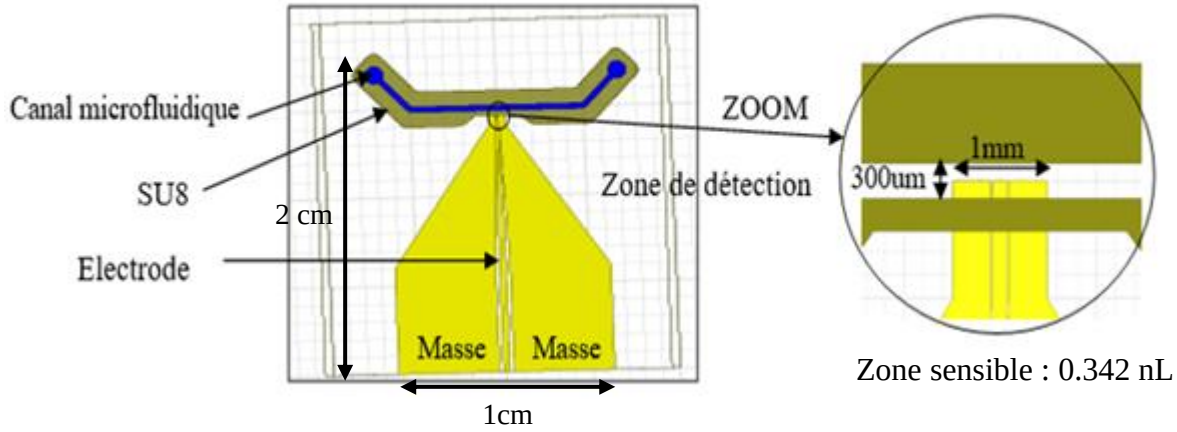


Ligne coaxiale à effet de bout [1]

Agilent 85070E probe[2]

- Ligne CPW à effet de bout miniaturisée **(Capteur simulé sur HFSS et fabriqué en salle blanche à l'ESIEE)**

Puce fabriqué et packagé



Zone sensible : 0.342 nL

Schéma du dispositif en vue de dessus

[1] N.Wagner, M. Schwing and A. Scheuermann, "Numerical 3-D FEM and Experimental Analysis of the Open-Ended Coaxial Line Technique for Microwave Dielectric Spectroscopy on Soil" IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 22 March 2013.
[2] Basics of measuring the dielectric properties of materials, Agilent Note, Agilent Technologies, 2006

Principe de mesure des propriétés d'un matériau en HF

- Méthode de caractérisation diélectrique par inversion du coefficient de réflexion [7]

Banc de mesure avec le dispositif pour déterminer la réponse fréquentielle en utilisant le VNA E8361C de Keysight.

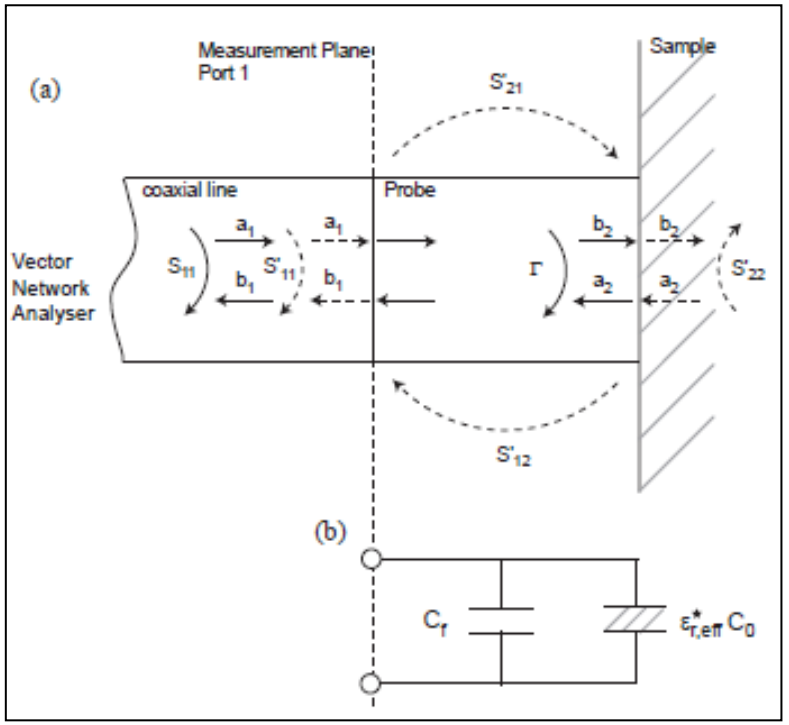
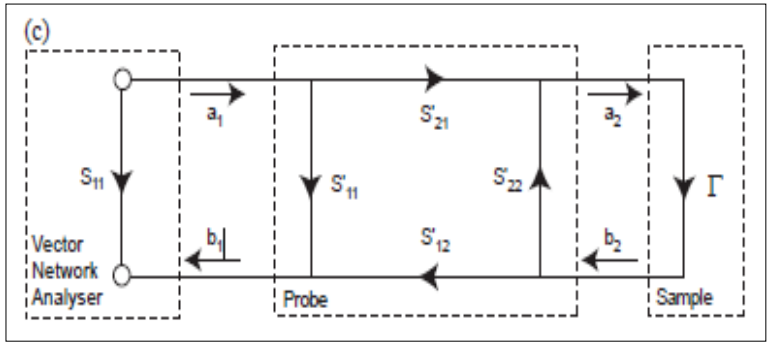


Schéma principe des plans de mesure d'une sonde à extrémité ouverte



Graphe de fluence de la sonde

[7] N. Wagner, M. Schwing and A. Scheuermann, "Numerical 3-D FEM and Experimental Analysis of the Open-Ended Coaxial Line Technique for Microwave Dielectric Spectroscopy on Soil" IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 22 March 2013.

Principe de mesure des propriétés d'un matériau en HF

- Méthode de caractérisation diélectrique par inversion du coefficient de réflexion [7]

$$Z^* = \frac{1}{Y^*} = Z_0 \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \quad ,$$

$$Z^* = (j\omega.C_f + j\omega.\varepsilon_r^* C_0)^{-1} \quad ,$$

$$\Gamma = \frac{a_2}{b_2} \quad , \quad \Gamma = \frac{S_{11} - S_{11}^{'}}{S_{22}^{'} S_{11} - \det S^{'}}$$

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11}^{'} & S_{12}^{'} \\ S_{21}^{'} & S_{22}^{'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_r^* = \frac{c_1 S_{11} - c_2}{c_3 - S_{11}}$$

Calibrage

Calcul des trois paramètres complexes en utilisant des milieux de référence (calibration):

$$\begin{cases} S_{11}^{o} c_1 - c_2 - \varepsilon_{r,o}^* c_3 = \varepsilon_{r,o}^* S_{11}^{o} \\ S_{11}^{w} c_1 - c_2 - \varepsilon_{r,w}^* c_3 = \varepsilon_{r,w}^* S_{11}^{w} \\ S_{11}^{L_1} c_1 - c_2 - \varepsilon_{r,L_1}^* c_3 = \varepsilon_{r,L_1}^* S_{11}^{L_1} \\ \vdots \\ S_{11}^{L_N} c_1 - c_2 - \varepsilon_{r,LN}^* c_3 = \varepsilon_{r,o}^* S_{11}^{L_N} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} S_{11}^{O} - 1 - \varepsilon_{r,O} \\ S_{11}^{W} - 1 - \varepsilon_{r,W}^* \\ S_{11}^{L1} - 1 - \varepsilon_{r,L1}^* \\ \dots \\ S_{11}^{LN} - 1 - \varepsilon_{r,LN}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\varepsilon_{r,O} S_{11}^{O} \\ -\varepsilon_{r,W}^* S_{11}^{W} \\ -\varepsilon_{r,L1}^* S_{11}^{L1} \\ \dots \\ -\varepsilon_{r,LN}^* S_{11}^{LN} \end{pmatrix} \Leftrightarrow MC = e$$

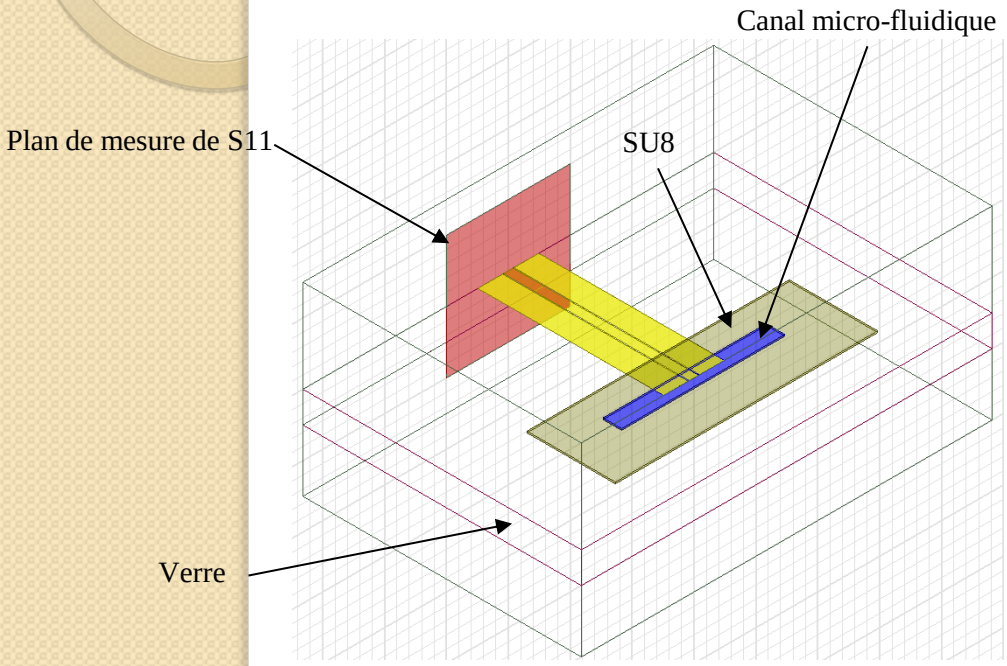
$$C = M^{-1} * e$$

$$\varepsilon_r^*(\omega,T) = \frac{c_1(\omega,T) S_{11}(\omega,T) - c_2(\omega,T)}{c_3(\omega,T) - S_{11}(\omega,T)}$$

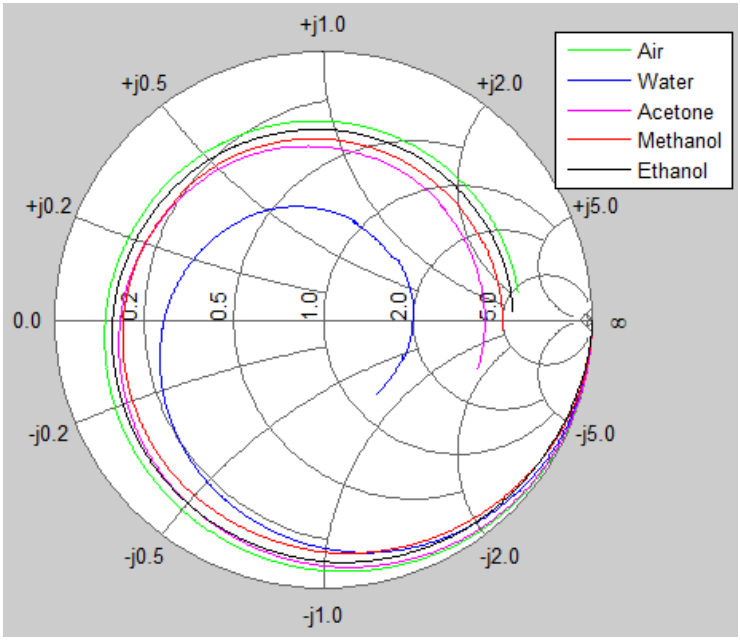
[7] N. Wagner, M. Schwing and A. Scheuermann, "Numerical 3-D FEM and Experimental Analysis of the Open-Ended Coaxial Line Technique for Microwave Dielectric Spectroscopy on Soil" IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 22 March 2013.

Présentation des résultats: Simulations sur HFSS (100 MHz – 8 GHz)

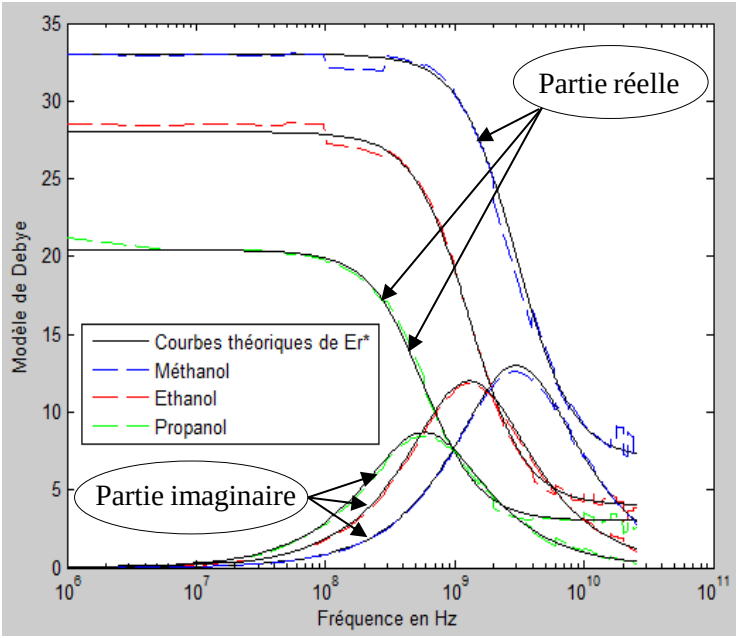
- Calibration avec 3 milieux : {Air, Eau déionisée, Acétone}



Modèle 3D du dispositif simulé sur HFSS



Coefficients de réflexion S11 , simulés sur HFSS, sur l'Abaque de Smith (10 MHz – 25 GHz)

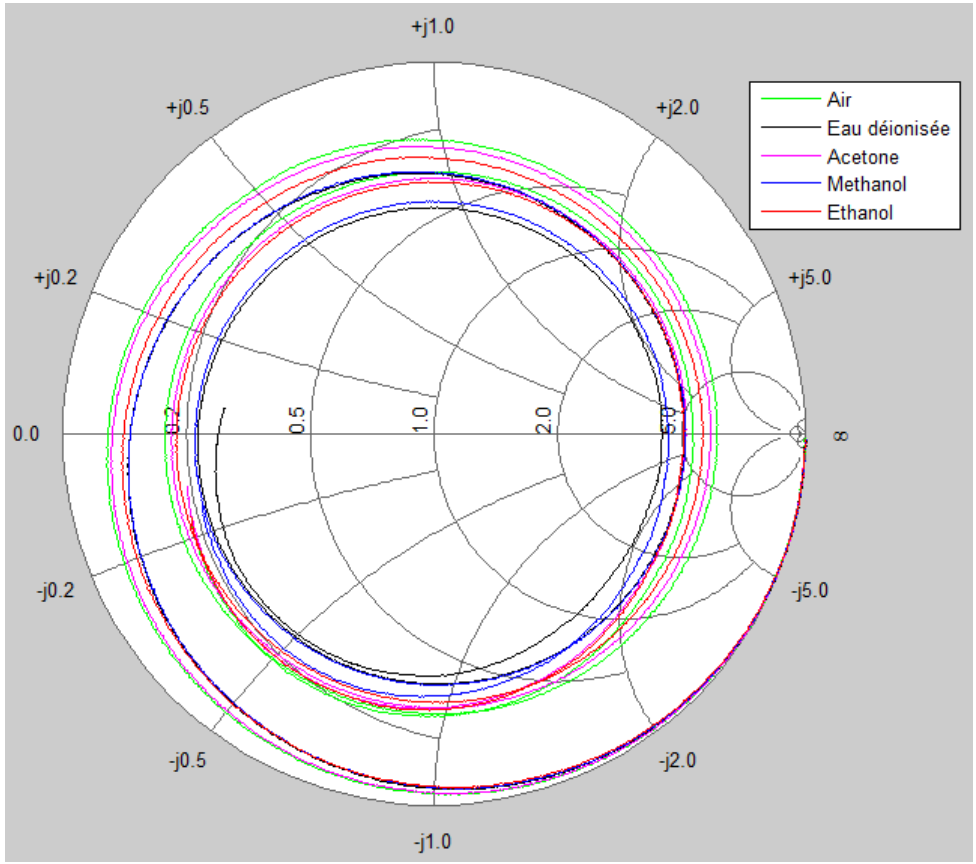


Permittivité complexe (parties réelle et imaginaire) des différents milieux : courbes théoriques et extraites des simulations sur HFSS

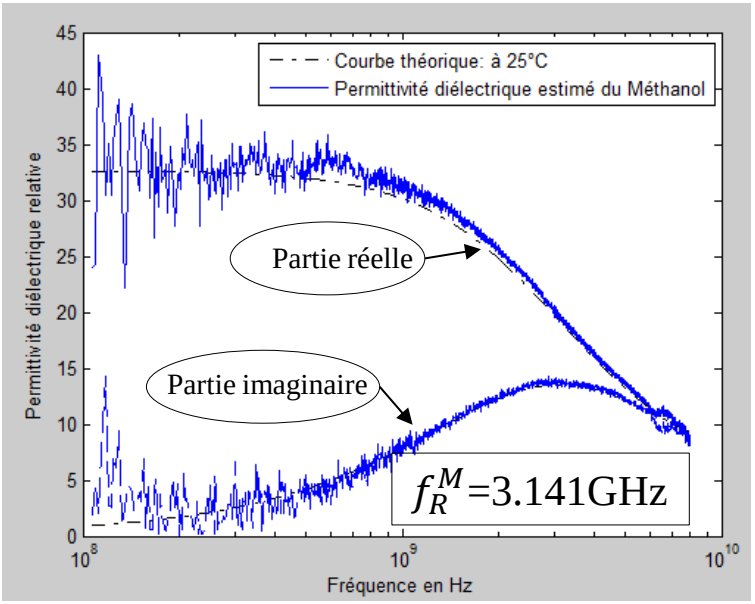
Présentation des résultats de mesures (100 MHz – 8 GHz)

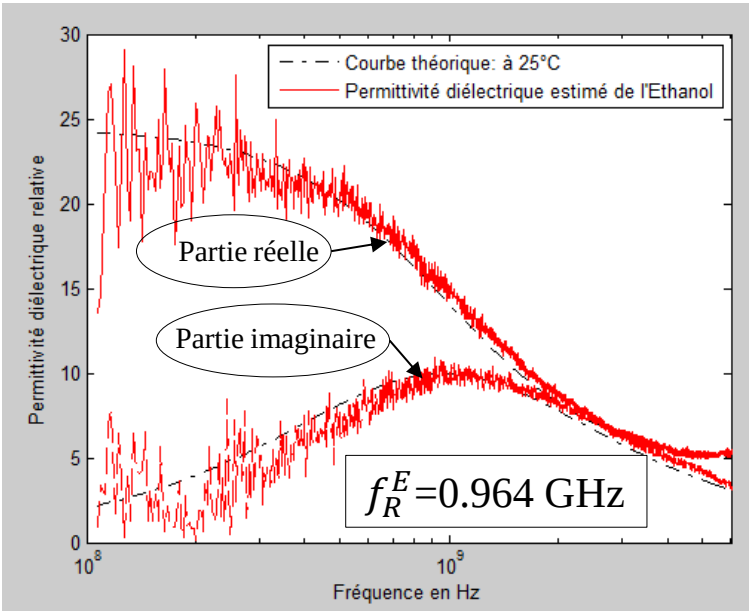
- Calibration avec 3 milieux : {Air, Eau déionisée, Acétone}

Banc de mesure avec le dispositif pour déterminer la réponse fréquentielle en utilisant le VNA E8361C de Keysight.



Coefficients de réflexion S11 mesurés pour différents milieux





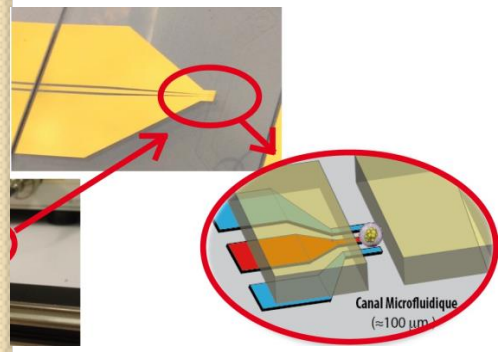
Permittivité diélectrique estimé

Conclusion

- Validation de la méthode d'extraction par des résultats des simulations numériques sur HFSS et des mesures
- Application de la méthode sur le biocapteur fabriqué en salle blanche de l'ESIEE Paris

Perspectives

- Etude des capteurs en réflexion aux dimensions d'une cellule unique (10µm)
- Comparaison avec un capteur en transmission
- Proposition de nouvelles méthodes d'extraction de permittivité
- Fabrication des capteurs et caractérisation expérimentale



Merci pour votre attention!

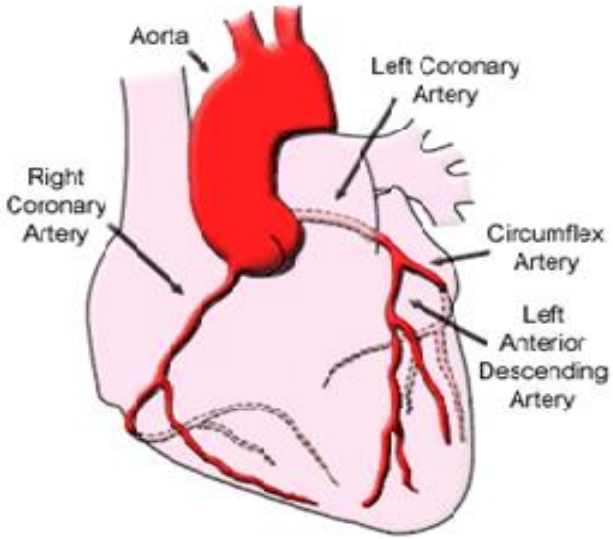
Quantification of collateral fluxes in patients with severe coronaropaties

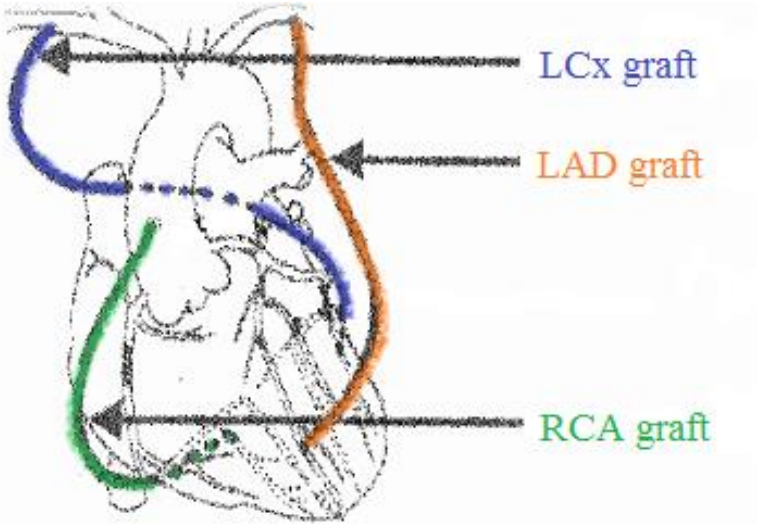
agnes.drochon@utc.fr, agnes.drochon@u-bordeaux.fr

Study motivated by the group of Cardio-Thoracic surgeons of the CHU PontChaillou in Rennes (Prs H. Corbineau et J.Ph. Verhoye, Drs I. Abouliatim, G.V. Ruggieri, A. Anselmi, M. Harmouche,), with the collaboration of M. Maasrani (Univ. Tripoli, Liban) and participation of Ch. Mariano (« Politecnico di Torino », Italie).

Context: Patients involved in this study show a total occlusion of the right coronary artery (RCA) and serious stenoses on the left main coronary artery (LMCA), the left anterior descending artery (LAD) and the circumflex artery (LCx).

⟶ Surgical deontology: 3 bypass grafts. But, after some time, pbs may re-appear …





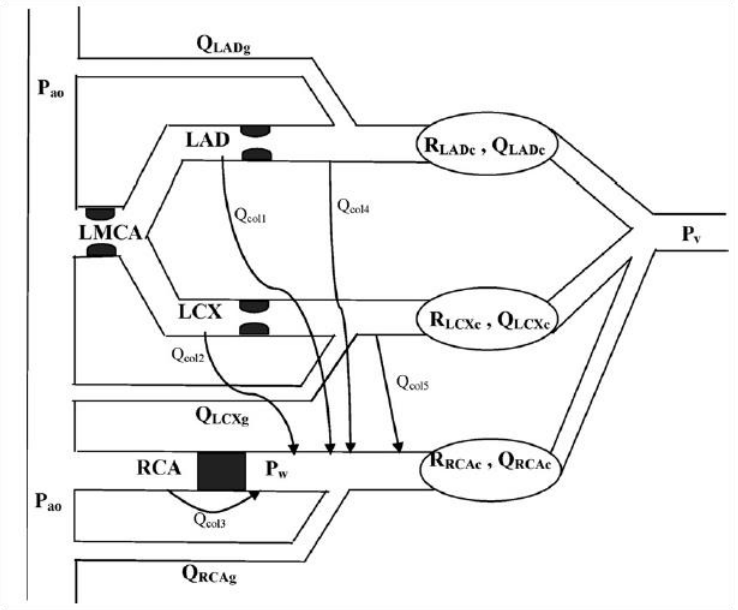
Motivation to develop a model

→ After some months or years, news pbs on the native arteries or on the grafts themselves may occur:

- At the location of the anastomoses
- Due to flow perturbations (stasis, re-circulation, presence of previous stents elsewhere…)
- Due to flow competitions: if a natural « derivation circuit » (named « collateral network ») has developed

→ Due to the size of the collateral vessels, these flows are difficult to visualize and to measure before surgery

→ Interest of a model in order to help quantifying collateral flows or other flow competitions and thus help defining the best surgical strategy



→ **Electrical analogy**

Pression P / Tension U
Flow rate Q / Intensity I

Resistance R $\quad U = R\,I$

Inductance L $\quad U = L\dfrac{dI}{dt}$

Compliance C $\quad U = \dfrac{1}{C}\int I\,dt$

Lumped parameter models

Windkessel model – O. Franck (1899)

Cardiac valve + elastic chamber (arterial compliance C) + peripheral resistance R

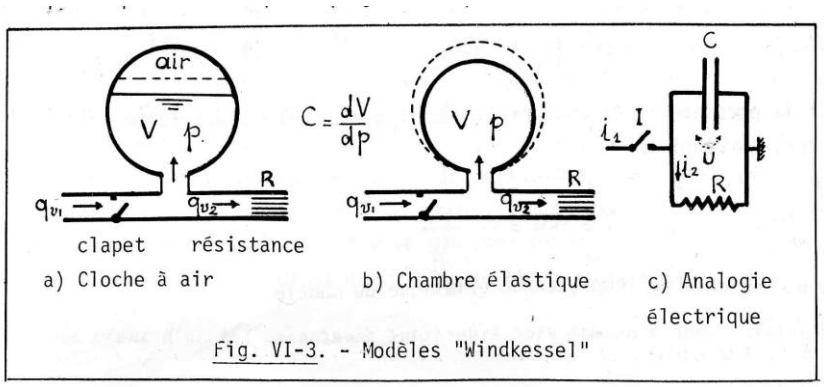


Fig. VI-3. - Modèles "Windkessel"

(From Comolet, 1984, Masson)

- No spatial dependency; time variable only
- Consider elementary components of the circulatory tree as « compartments »
- Flow rate and pressure are averaged in space over the whole compartment
- Wave propagation and reflection cannot be incorporated

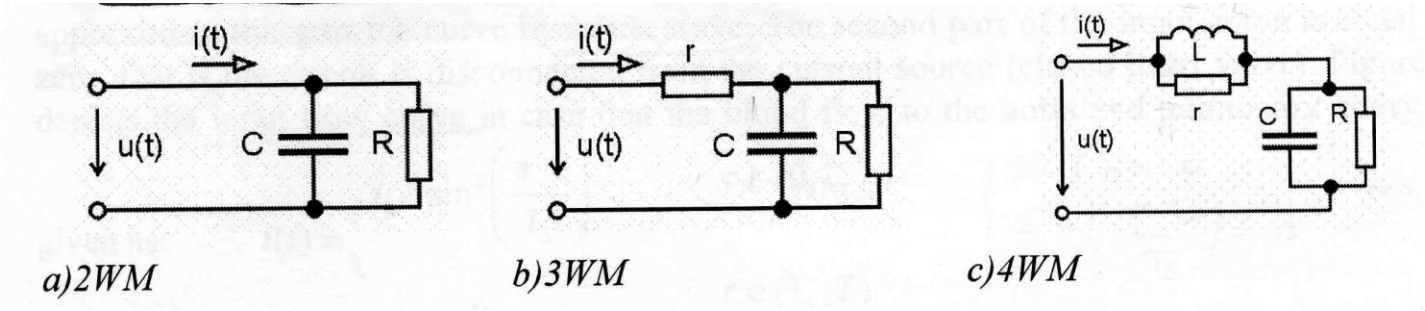
Parameter determination

Vessel length l, radius a, wall thickness h, wall Young modulus E:

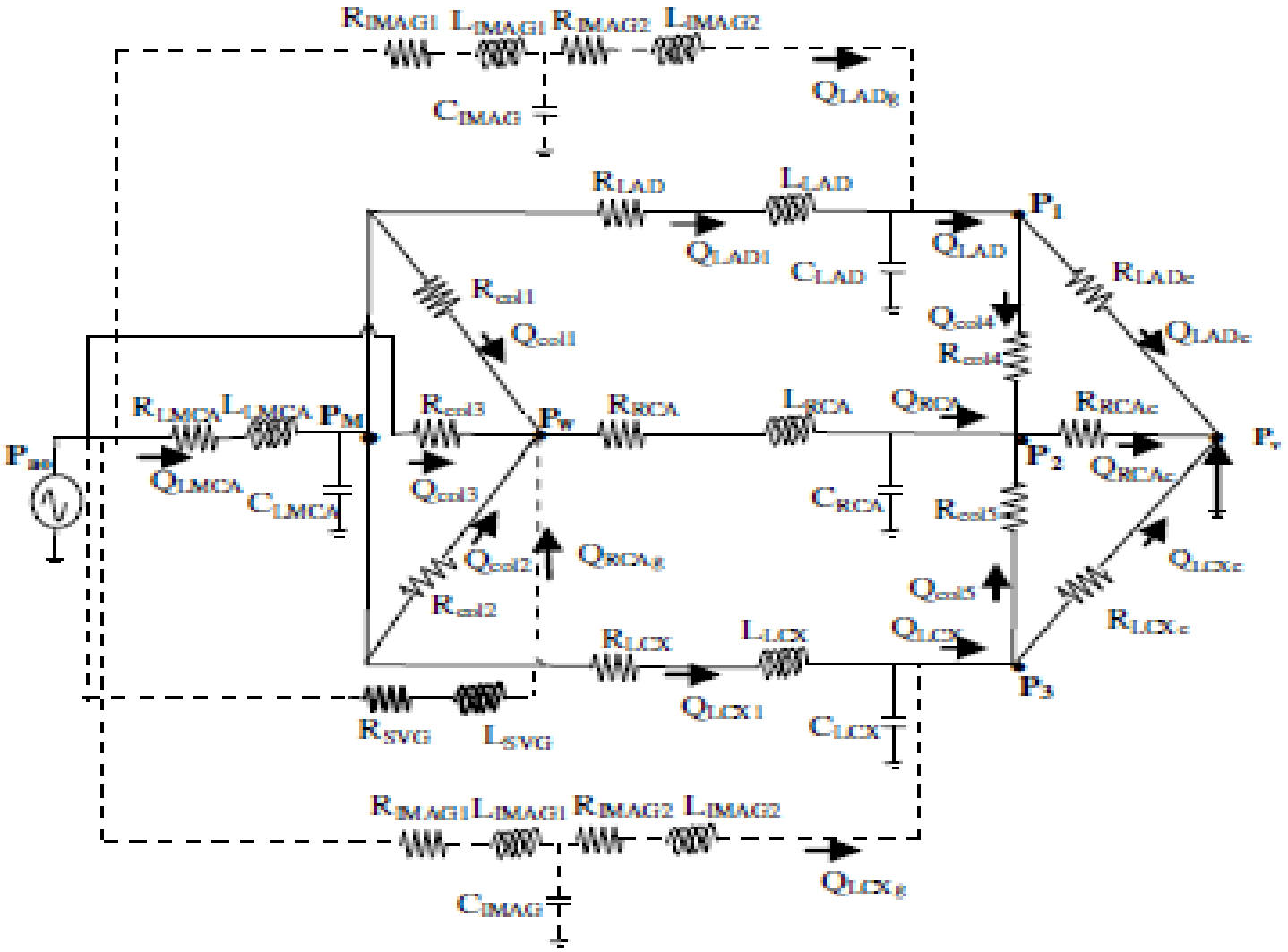
$$R = \frac{8\mu l}{\pi a^4} \qquad L = \frac{\rho l}{\pi a^2} \qquad C = \frac{2\pi a^3 l}{Eh}$$

Pietrabissa et al. (*Med. Engin. Physics, 1996*)

→ Extensions of Windkessel's model



In our case …



Input data : physiological $P_{ao}(t)$, adapted to each patient

Parameters determination for this model

- For LAD, LCX, RCA and the grafts:

  R_0, L_0 , C_0 taken from Pietrabissa et al. (*Med Eng Phys 1996*)

- Correction for the area reduction:

$$R = R_0\alpha^{-2} \qquad C = C_0\alpha^{3/2} \qquad L = L_0\alpha^{-1}$$

with: α =1-p, p = % of area reduction

→ % of area reduction is known from the angiographic examination performed before surgery

R_{LADc}, R_{LCxc}, R_{RCAc}, R_{col}

are calculated using the clinical measurements made during surgery

Surgical procedures:

0G: no graft at all
1G: SVG (on RCA)
2G: IMAG (on LAD and on LCx)
3G: all grafts (SVG + IMAGs)

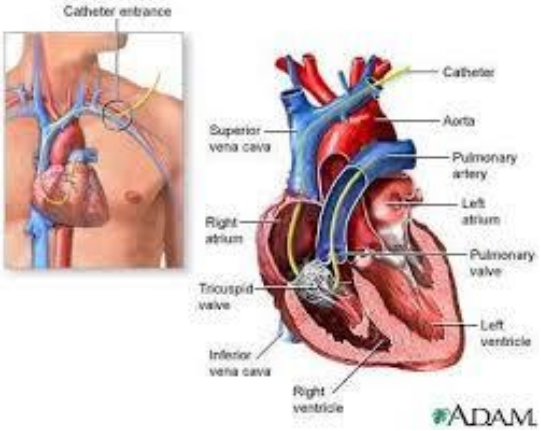
P_w (0G), P_w (2G), Q_{grafts}
In all the situations: P_{ao}, and P_{VC}

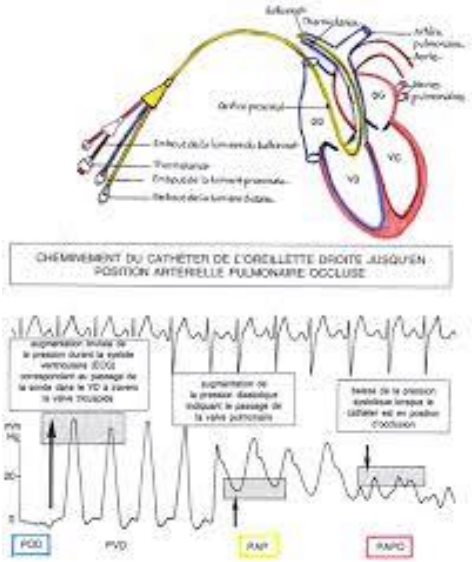
- Capillary resistances are deduced from the clinical data of the 3G case
- Collateral resistances are determined with an iterative procedure, using P_w (2G)
- In systole, the cap. resist. increase because of ventricular contraction → R_{cap} (t)

Measurement devices

Pressure measurement:

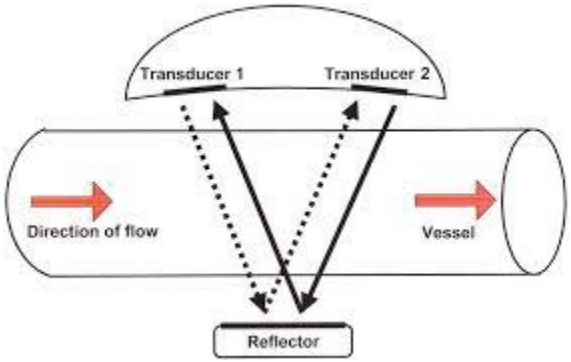
Swan-Ganz catheter





Flow measurement:

Medistim Flowmeter:
Transit Time flowmeter



Ultrasound pulses transmitted from two separate piezo electric crystals located on the same side of the probe.
US beams cross the vessel and are reflected back to the crystals.
The difference in transit time between the pulse going upstream and the one going downstream is proportional to the volume of flow passing through the probe.

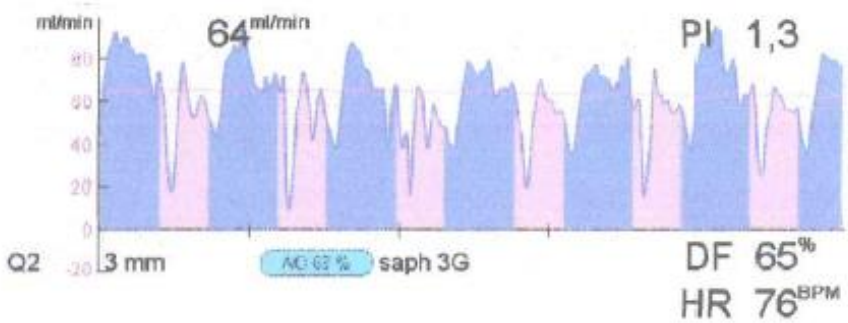
Simulations time-varying capillary resistances

Double-Sinus ($\delta_1 = 0.5$, $\delta_2 = 0.3$)

$$R_{cap}(t) = \begin{cases} R_0 + \delta_1 R_0 \ sin\left(\frac{\pi t}{t_s}\right) \ pour \ 0 \leq t \ll t_s \\ R_0 + \delta_2 R_0 \ sin\left(\frac{\pi(t - t_s + t_d)}{t_d}\right) \ pour \ t_s \ll t \ll T \end{cases}$$

Flow in the grafts – Case 3G

Recordings from Patient 16

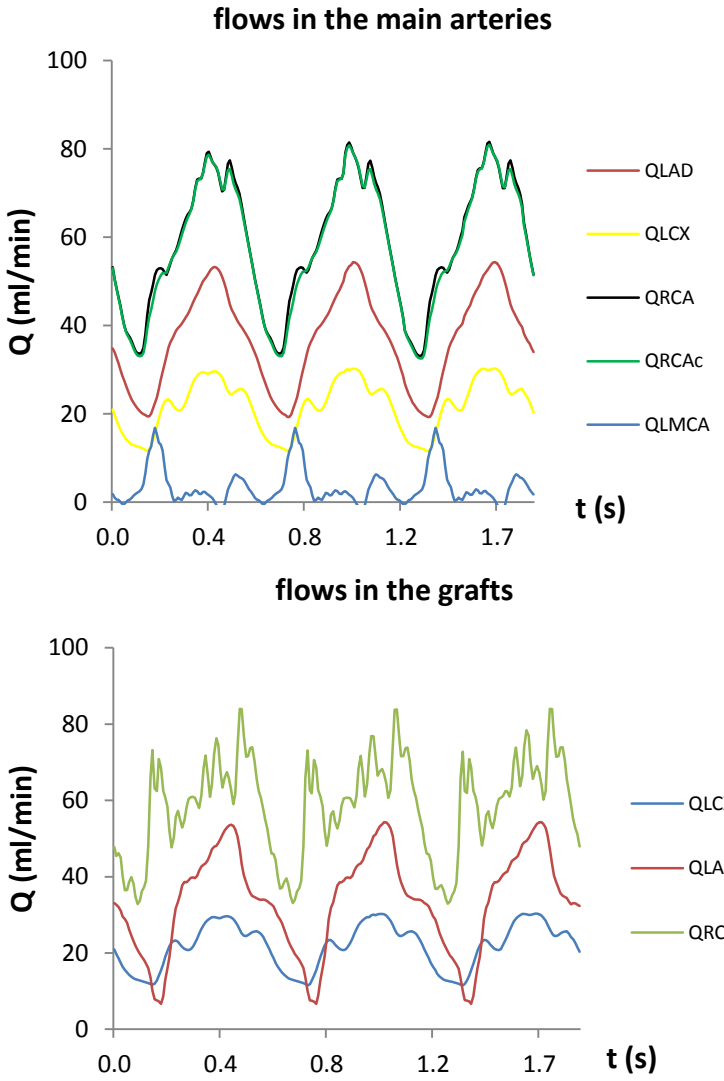


Blue = diastole, pink = systole

Global simulations results

Flow rates and pressures everywhere in the network for each of the 22 patients included in the study

Simulations (Pat. 16, Case 3G)

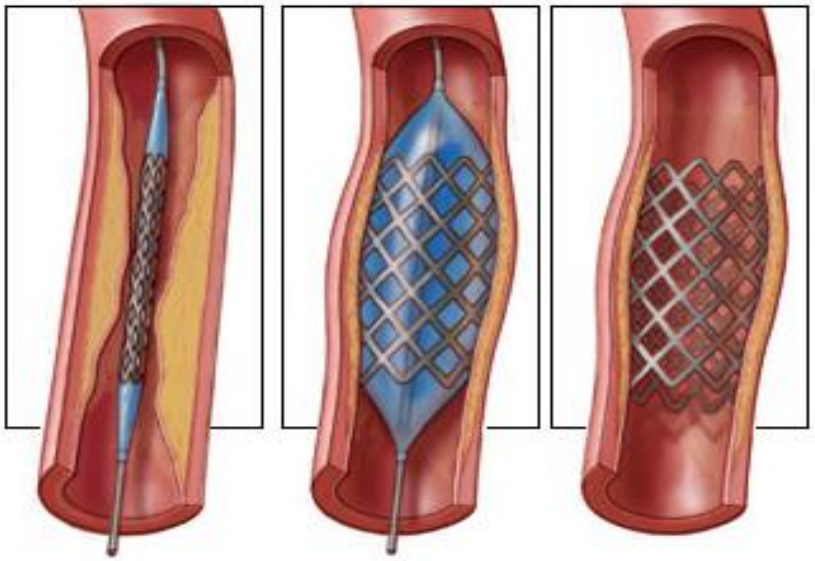


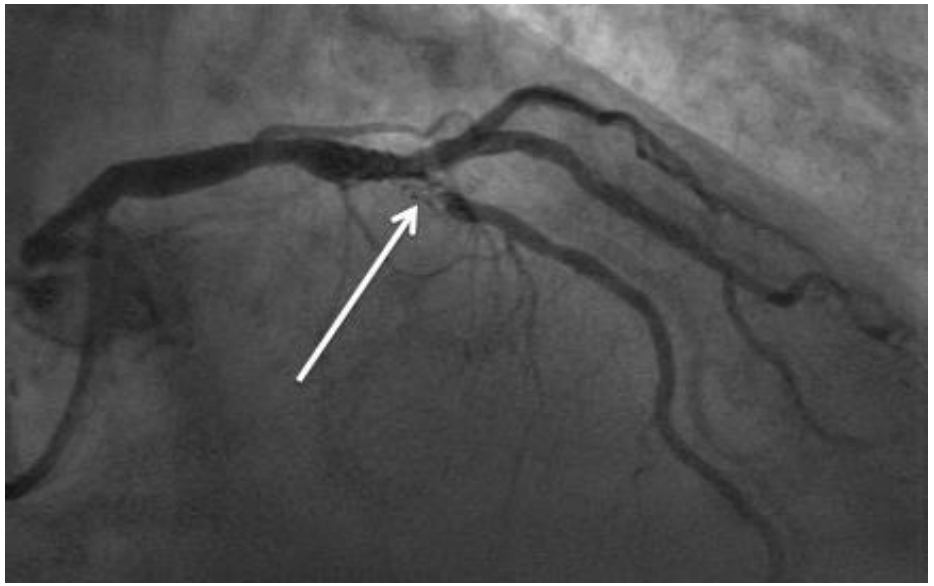
Among the results …

- Necessity of the complete revascularization (3G) for most of the patients : collateral flows remain low in any cases
- For some patients, negative collateral flow may occur: from RCA to left branches
- Flow in the native stenosed arteries become low when the left grafts are present
- Influence of the mechanical properties of the grafts: vein (SVG) vs arteries (IMA)
  Important oscillations on SVG flow profiles: some turbulence is present ?
- Very high collateral resistances in 1 patient with diabetes
- Main influence of the capillary resistances, in all cases
- Previous stent implantation: mechanical injury of the vessel wall, flow perturbations, inflammatory reactions, … may lead to restenosis.
  DES (Drug Eluting Stents) have been proposed: they deliver anti-proliferative drugs, in order to avoid re-stenosis…. But these drugs also affect collateral angiogenesis and existing endothelium. This may lead to acute thrombosis, and high risk for the patient because he has no more collateral flow.

Intra-Stent restenosis

Patient 17, from Dr Amédéo Anselmi





Intra-stent (on LCx) restenosis

Patient	R_{LADc}	R_{LCxc}	R_{RCAc}	R_{col}
17	241.44	808.30	212.83	2980.00
Moyenne ± SD	159.31±102.40	187.06±185.08	138.22±88.15	883.82±774.46

→ For this patient, the presence of a DES on LCx has induced an important increase of R_{LCXc} (mmHg.s/ml) and a complete loss of collaterality

Suggestions to improve the model …

The existing model, « descriptive »

- Improve the representation of collateral pathways and resistances
- Improve the input data $P_{ao}(t)$, the functions $R_{cap}(t)$
- Augment the « data-base » of the results , including more patients in the study

A predictive model ?

It would require the modelisation of the flows and pressures in the areas of the anastomoses

Pb : the determination of the « patient's specific » parameters ?

Célien ZACHARIE

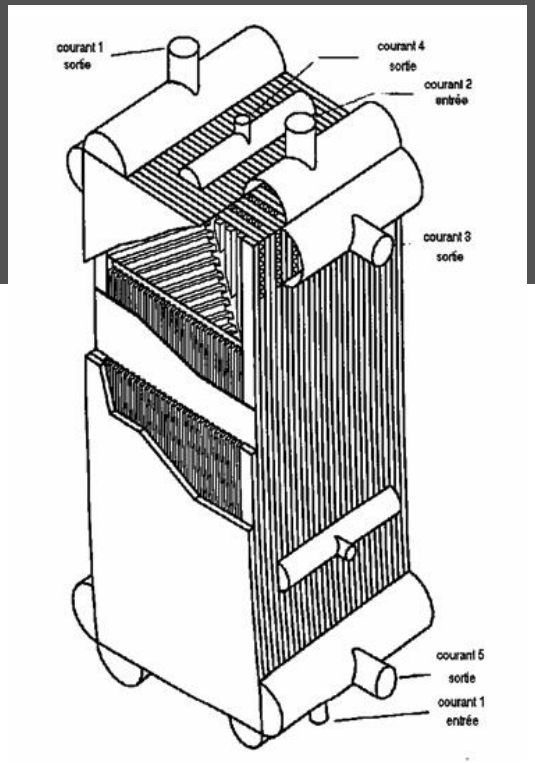
IDENTIFICATION DE FONCTIONS DE TRANSFERT DANS UNE CHARGE BRASÉE SOUS VIDE À PARTIR DE MODÈLES ARX

8ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation de Bordeaux

30 janvier 2019

Autres auteurs communication : Benjamin REMY, Vincent SCHICK **(LEMTA)**
Gaëtan BERGIN, Renaud EGAL et Thierry MAZET **(FIVES CRYO)**

LE PRODUIT



- Fabricant d'échangeurs thermiques à plaques et ailettes brasées
- Equipements de transfert de chaleur compacts et efficaces
- Quelques applications : unités de séparation de l'air, traitement du gaz naturel, GNL, procédés à basse température
- Production annuelle d'échangeurs : ≈ 300 / an

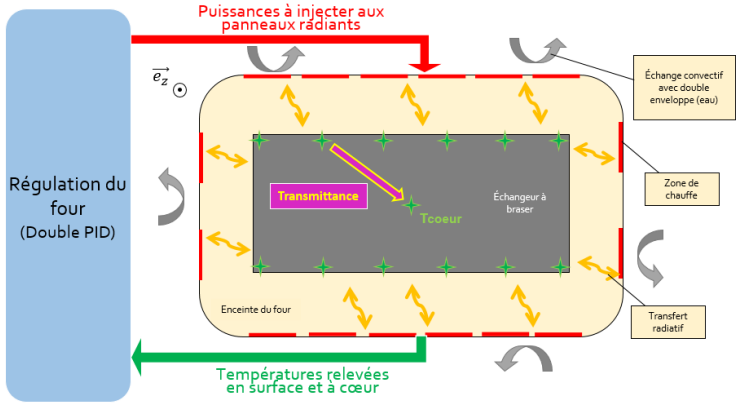
PLAN DE LA PRÉSENTATION

Contexte et outils

- Problématique industrielle
- Présentation du four de brasage
- Données thermiques recueillies
- Modèles paramétriques ARX

Application

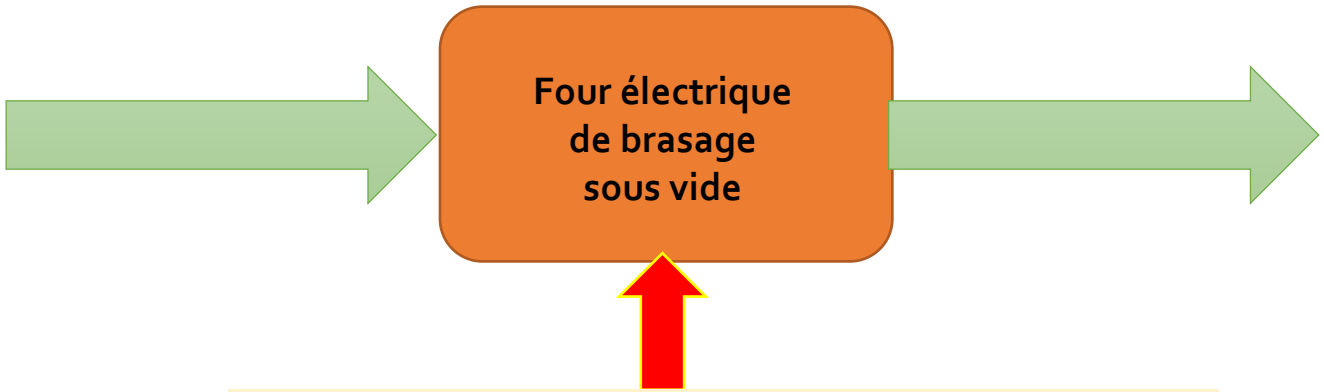
- Etude de faisabilité via un modèle numérique
- Comparaison de cycles pour des échangeurs de même géométrie



$$y(t_i) = -\sum_{j=1}^{n_a} a_j y(t_i - j\Delta t) + \sum_{j=1}^{n_b} b_j u(t_i - j\Delta t - n_k \Delta t)$$

CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET PRÉSENTATION DES OUTILS

L'ÉTAPE DU BRASAGE *DANS LE PROCÉDÉ DE FABRICATION DES ÉCHANGEURS*



Etape cruciale du BRASAGE dans le procédé de fabrication des échangeurs :

- Fusion de la **brasure :** intervalle restreint autour de $\mathbf{578°C}$
- **Ne pas surchauffer** $> \mathbf{600°C}$
- Assurer une chauffe et un refroidissement de la charge les plus **homogènes** possible

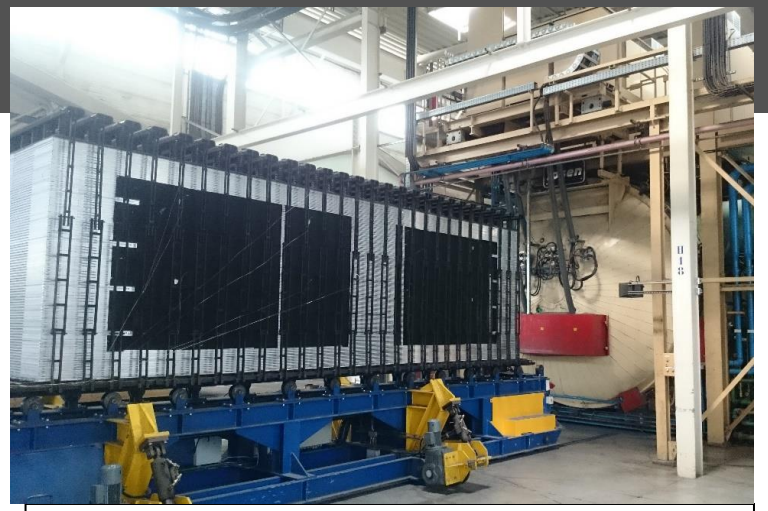


Photo de l'un des deux fours sur site et d'un échangeur avant enfournement

Problématique soulevée :

- **Taux de rebuts** des échangeurs après essais de mise sous pression trop important
- On suppose que les fragilités naissent lors de l'étape de brasage (thermique)

STRATÉGIE DE RÉGULATION DU FOUR ÉLECTRIQUE DE BRASAGE SOUS VIDE

Caractéristiques du four étudié :

- 88 panneaux radiants
- Jusqu'à 96 thermocouples sur la charge
- Chauffe de la charge **sous vide**
- Refroidissement par injection d'azote (en partie)
- Puissance électrique théorique maximale du four : $\approx 2MW$
- Elaboration des consignes de puissances toutes les minutes à partir des températures de la charge (régulation double PID)

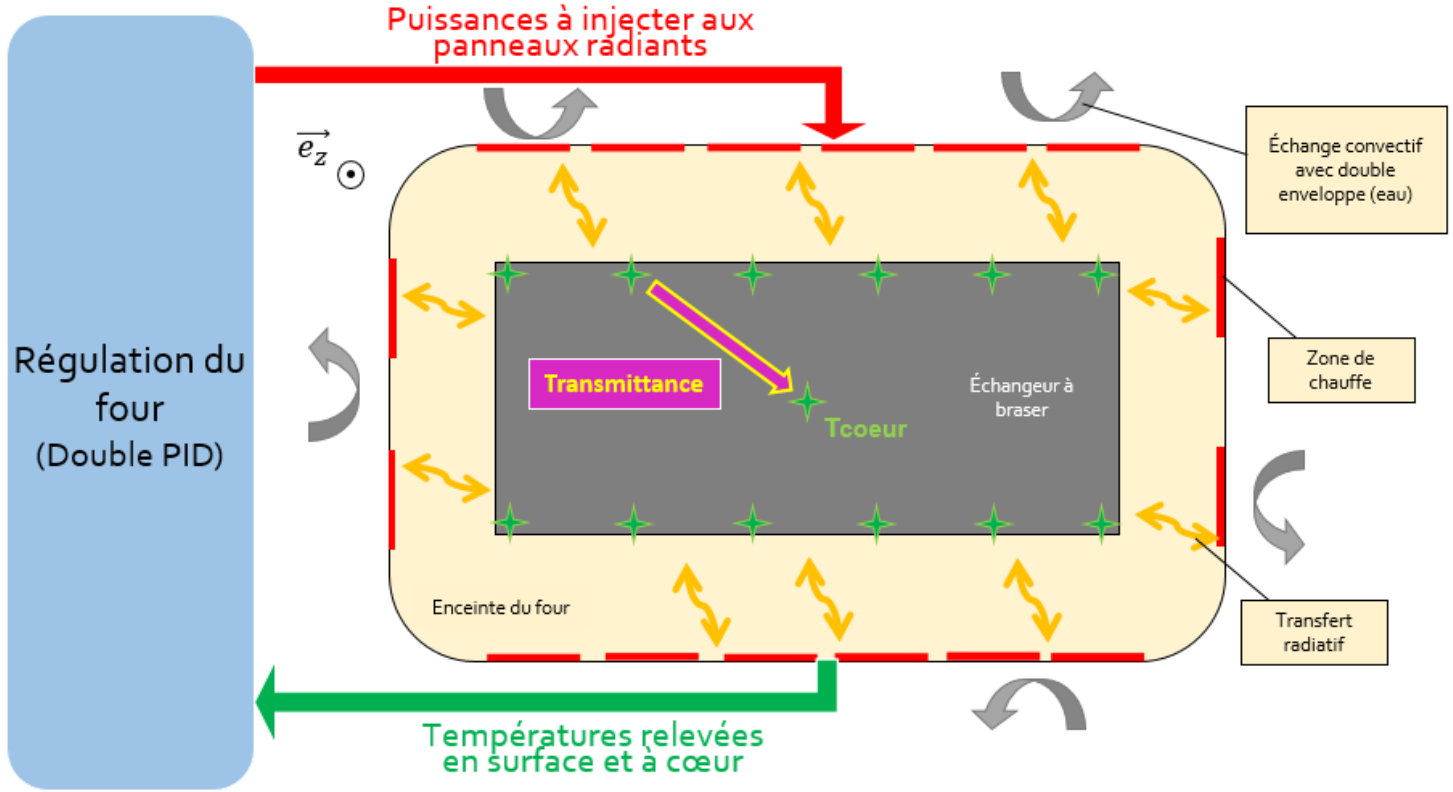
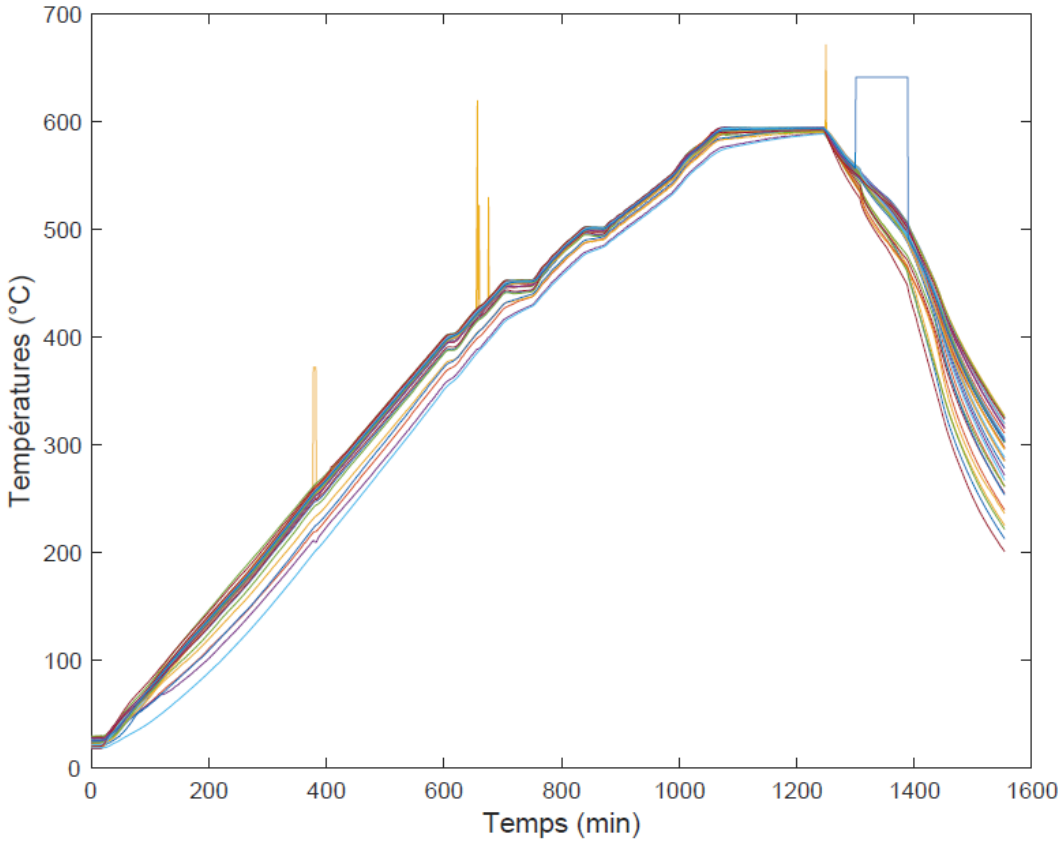


Schéma en coupe horizontale du système { four + charge }

EXPLOITATION ACTUELLE DES DONNÉES ISSUS D'UN CYCLE DE BRASAGE



Températures relevées pour les 36 thermocouples en surface d'échangeur au cours d'un cycle

Analyse des courbes de brasage :

- **Echangeur sain ?**
- **Echangeur défectueux ?**

Formalisation de critères de comparaisons quantitatifs difficile :

- Entre deux cycles aboutissant à des matrices saines
- Pour discriminer un cycle donnant une matrice défectueuse

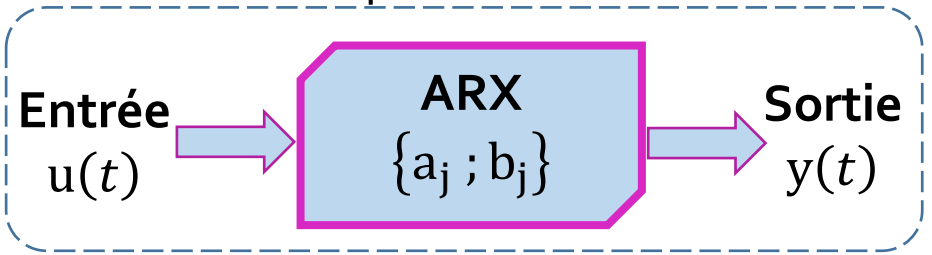
→ Critères trop macroscopiques (la régulation amène « globalement » la charge au palier de brasage)

→ Détection de forts gradients locaux pendant la chauffe non systématique

UNE NOUVELLE EXPLOITATION DES DONNÉES : **LES FONCTIONS DE TRANSFERT**

Obtenir plus d'informations à partir des données thermiques :

Extraire des données thermiques des **FONCTIONS DE TRANSFERT** entre différents points du système (**signature thermique)**



Modèles autorégressifs :

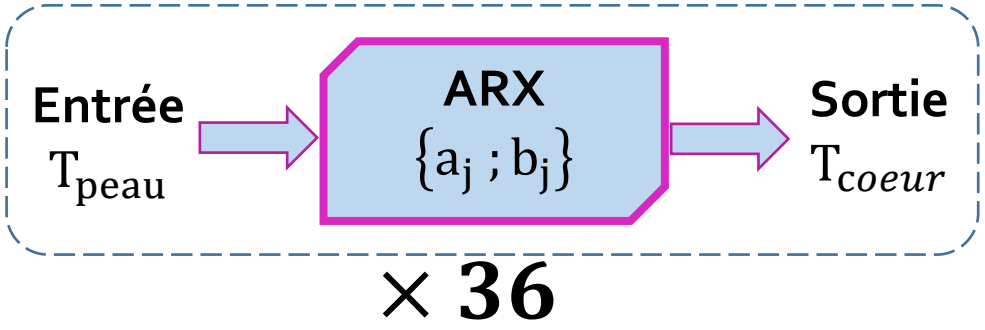
Généralisation des bilans enthalpiques et convolutifs

Structure des modèles ARX (Auto Regressive model with eXternal inputs) :

$$y(t_i) = \underbrace{-\sum_{j=1}^{n_a} a_j\, y(t_i - j\Delta t)}_{\text{partie autorégressive}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{n_b} b_j\, u(t_i - j\Delta t - n_k\Delta t)}_{\text{partie exogène}}$$

APPLICATION AUX DONNÉES EXPÉRIMENTALES

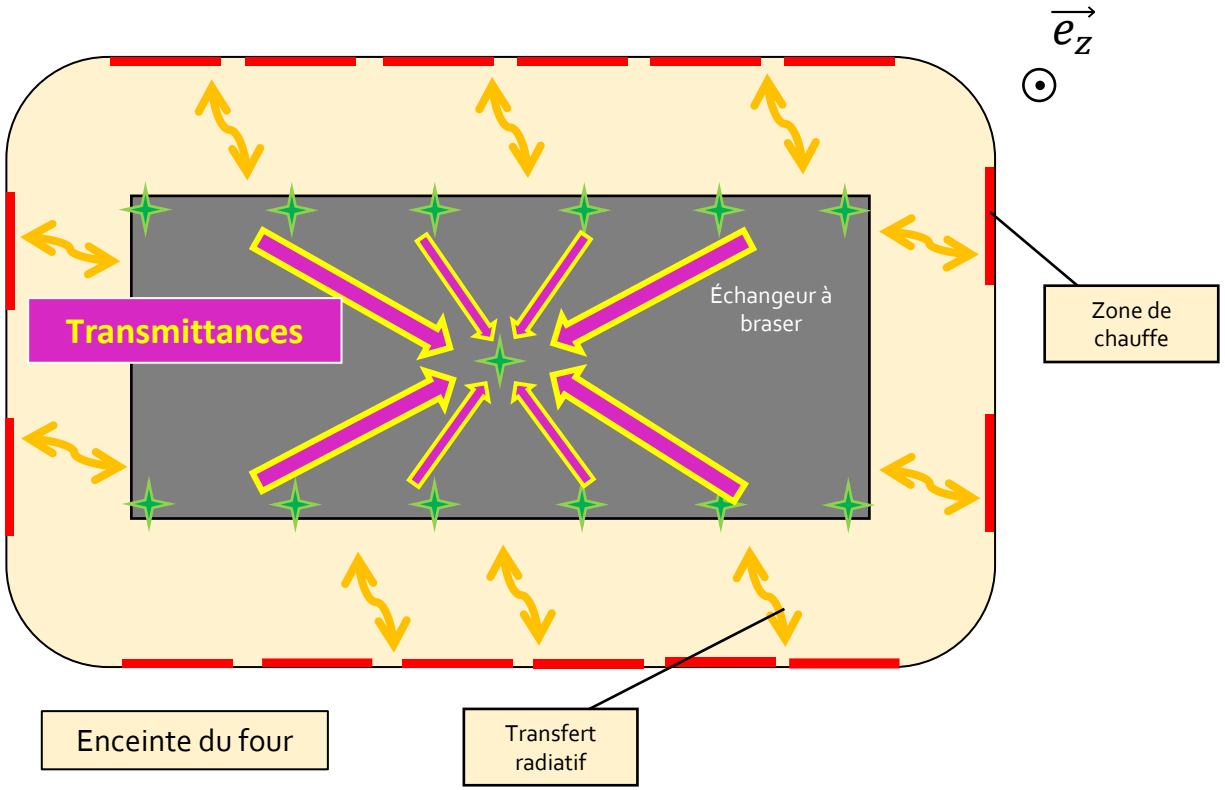
FONCTIONS DE TRANSFERT ÉTUDIÉES :
PEAU → CŒUR



<u>Etude préliminaire</u> :
Identification des fonctions de transfert au sein de la charge (calibration + validation)

FlexPDE

<u>CCL</u> : les fonctions de transfert T_{peau} → T_{coeur} peuvent être identifiées

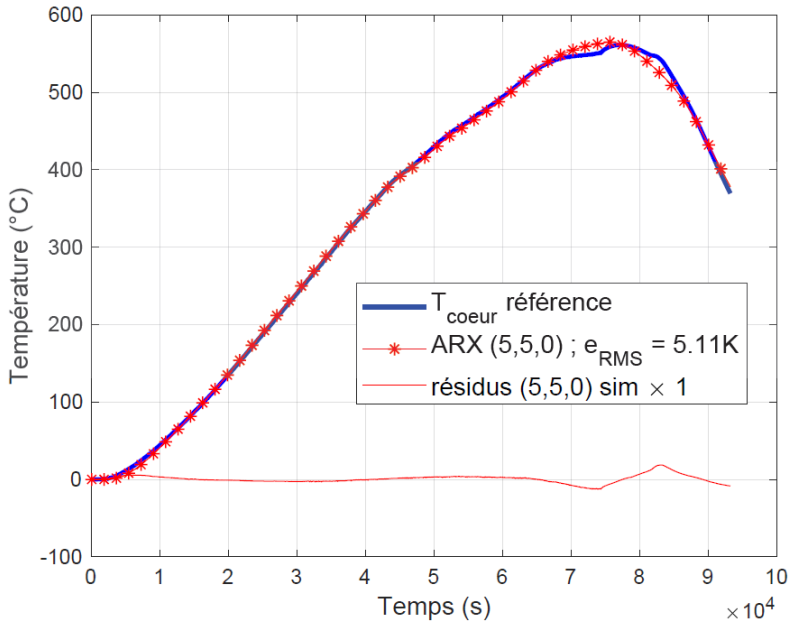


FONCTIONS DE TRANSFERT **PEAU → CŒUR**
TRAITEMENT D'UN THERMOCOUPLE

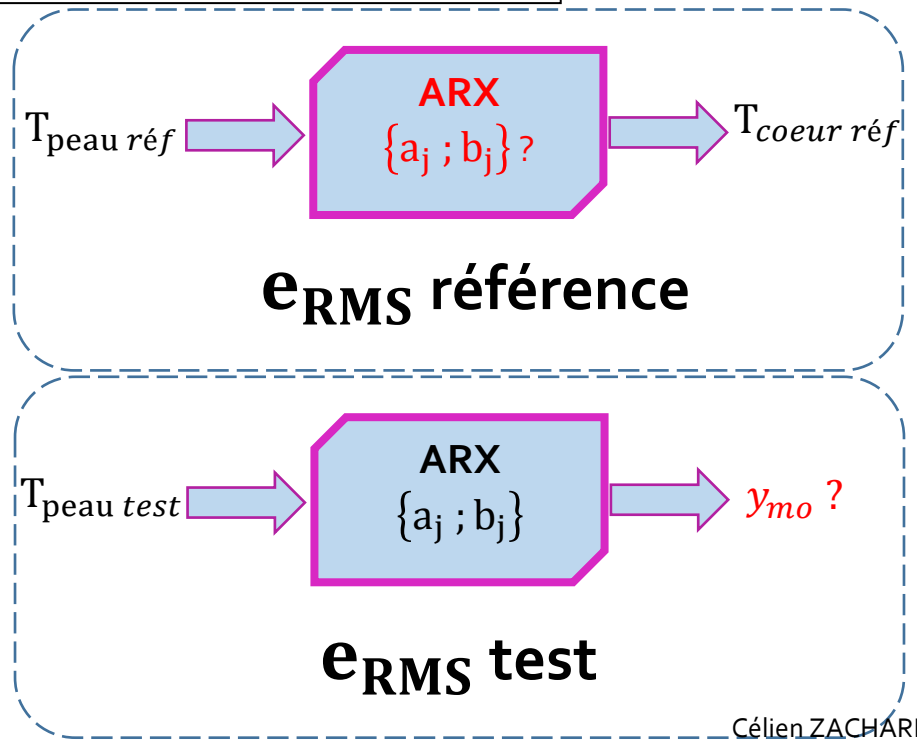
Erreur moyenne quadratique (qualité d'ajustement) :

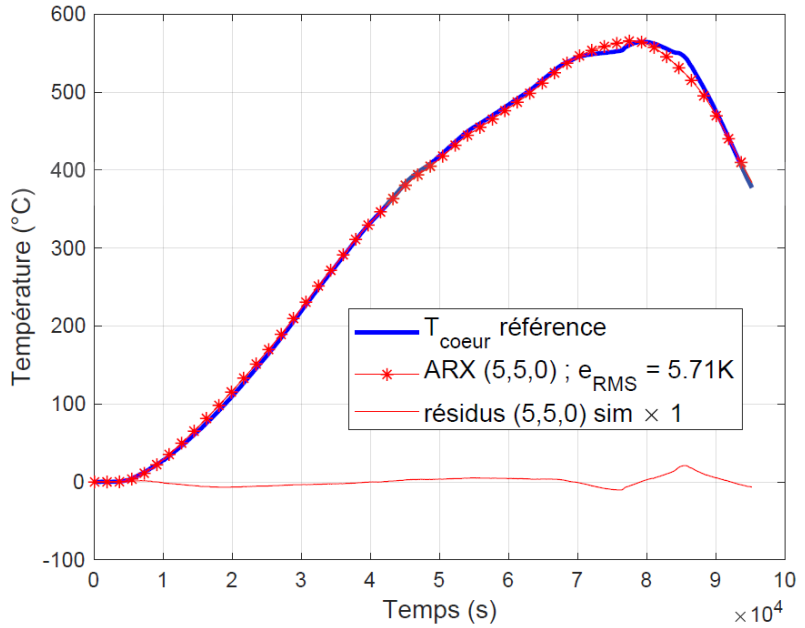
$$e_{RMS} = \left\| \boldsymbol{T}_{coeur\ référence} - \boldsymbol{y(t)} \right\| = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left(T_{coeur}(t_j) - y(t_j)\right)^2}$$

Observable proposée : $\dfrac{e_{RMS\ test}}{e_{RMS\ reference}}$



Calibration d'un modèle ARX



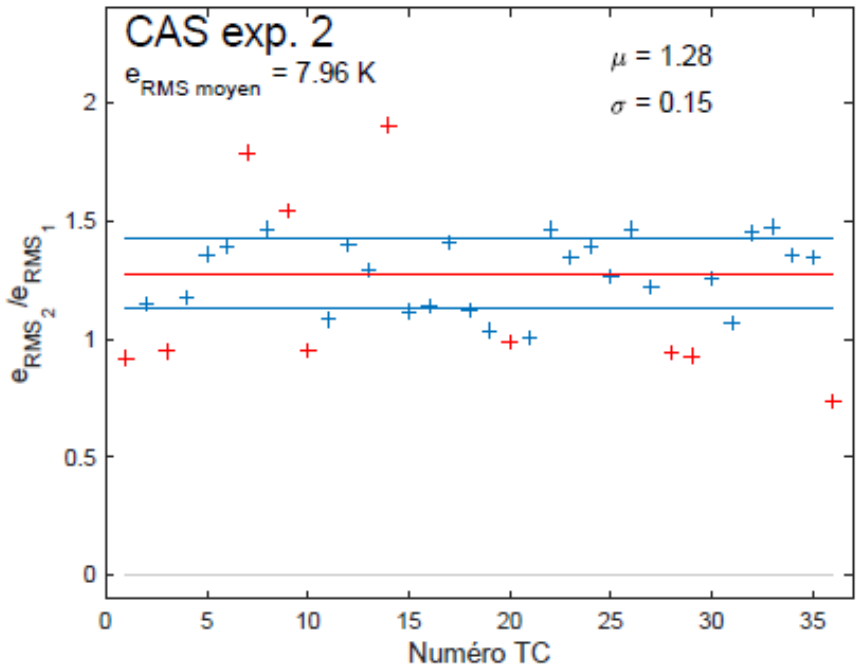


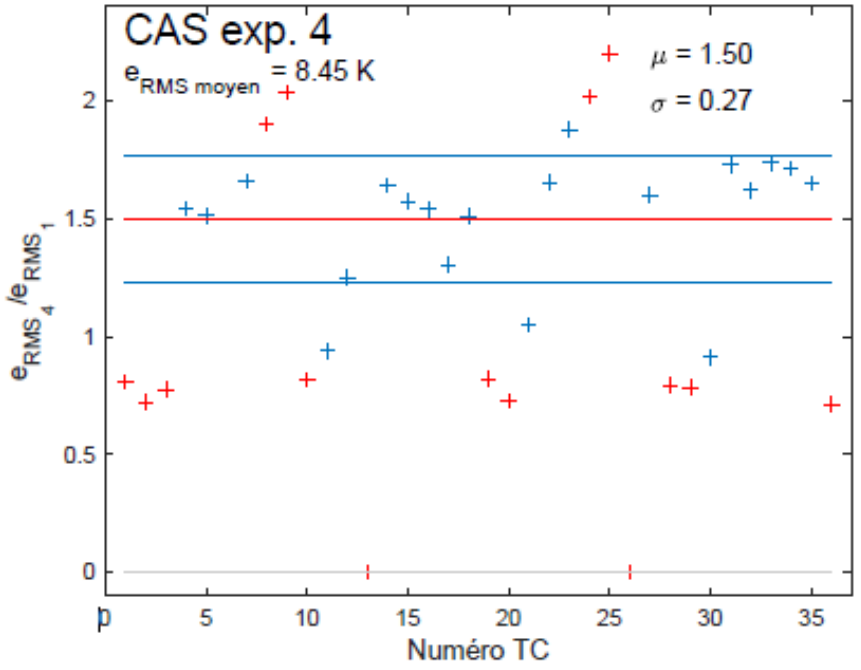
Test de ce modèle par comparaison avec la sortie qu'il doit reconstituer

FONCTIONS DE TRANSFERT **PEAU → CŒUR**
RÉSULTATS EN TERMES D'AMPLIFICATION D'ERMS

Calibration sur l'échangeur de référence n°1

Comparaison avec les autres échangeurs de la série en **validation / test**





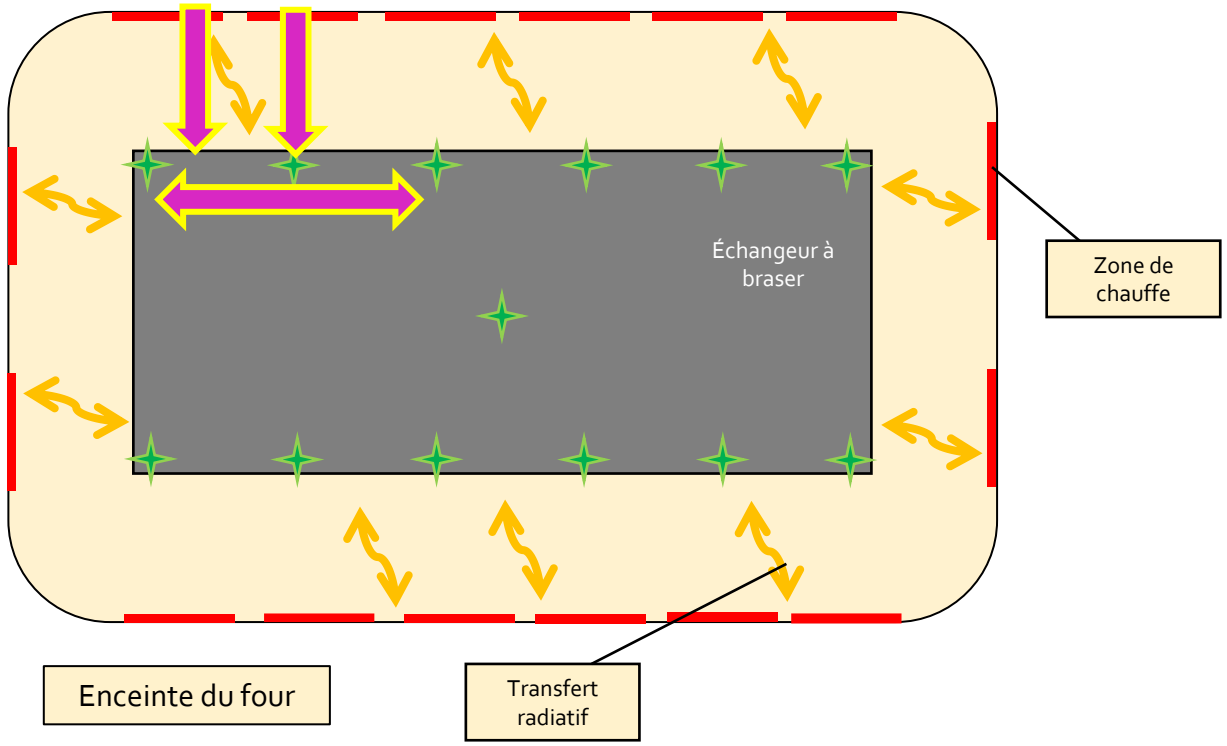
Commentaires :

- Echangeur n°2 proche du cas de référence (moyenne μ des taux d'amplification le plus faible)
- Echangeur n°4 a un taux d'amplification en moyenne plus éloigné + plus grande dispersion σ

CONCLUSION

CONCLUSION & PERSPECTIVES

- Les modèles paramétriques de type ARX peuvent représenter le transfert thermique entre la surface de l'échangeur et son centre géométrique.
- À partir de fonctions de transfert T_{peau} - T_{coeur} expérimentales, l'observable $e_{RMS}/e_{RMSréf}$ permet de comparer différents cycles de brasage à un cycle de référence.
- Corrélations entre flux et températures à explorer (impédances), modèles multi-entrées



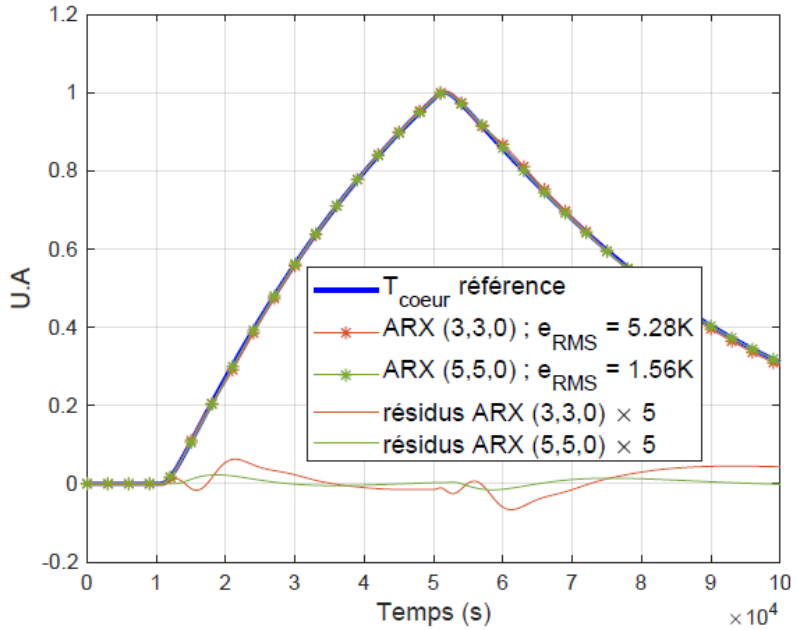
MERCI DE VOTRE ATTENTION !

Echangeur avant enfournement sur le site de Golbey (88)

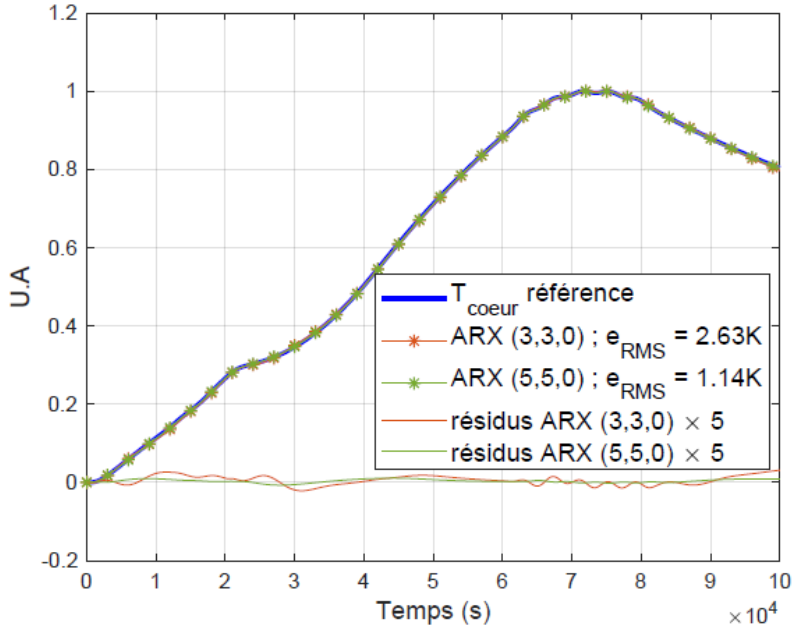
FONCTIONS DE TRANSFERT **PEAU → CŒUR** IDENTIFICATION DES FONCTIONS POUR 1 TC

Introduction de l'erreur moyenne quadratique (équivalent du pourcentage d'ajustement) :

$$e_{RMS} = \left\| \boldsymbol{T}_{coeur\ référence} - \boldsymbol{y(t)} \right\| = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left(T_{coeur}(t_j) - y(t_j)\right)^2}$$



Estimation (calibration) de deux modèles ARX

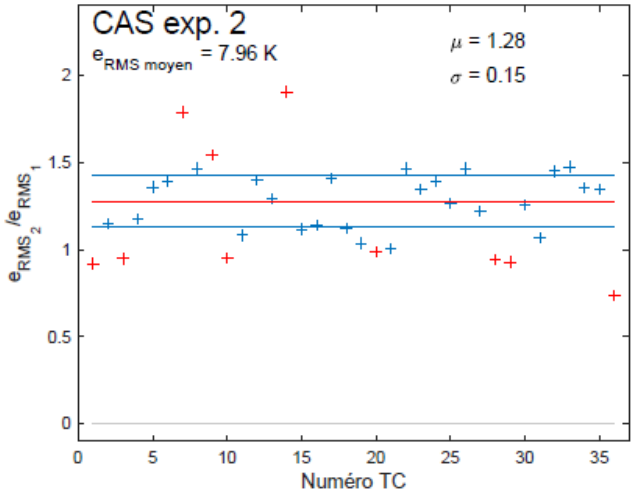


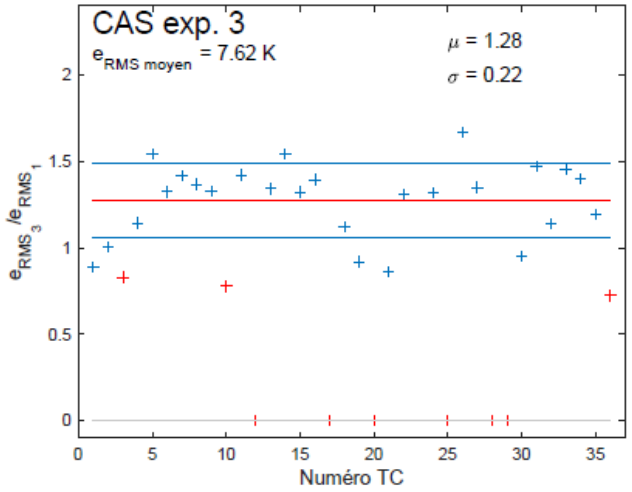
Validation des modèles estimés avec une autre sollicitation

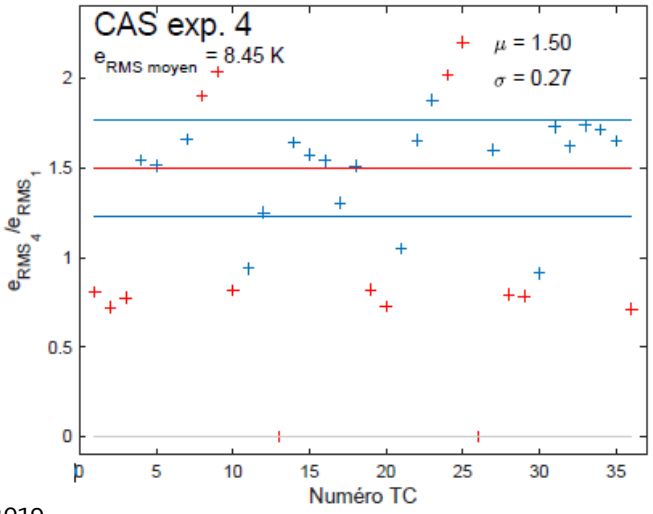
FONCTIONS DE TRANSFERT **PEAU → CŒUR**
RÉSULTATS EN TERMES D'AMPLIFICATION D'ERMS

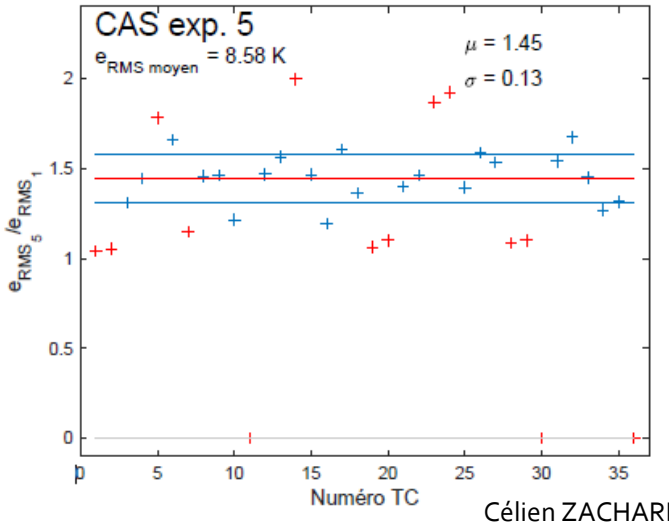
Calibration sur l'échangeur de référence n°1

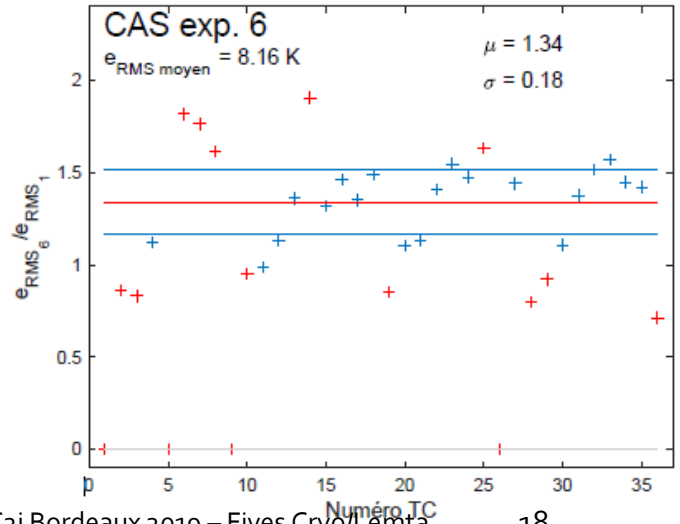
Comparaison avec les autres échangeurs de la série en **validation / test**





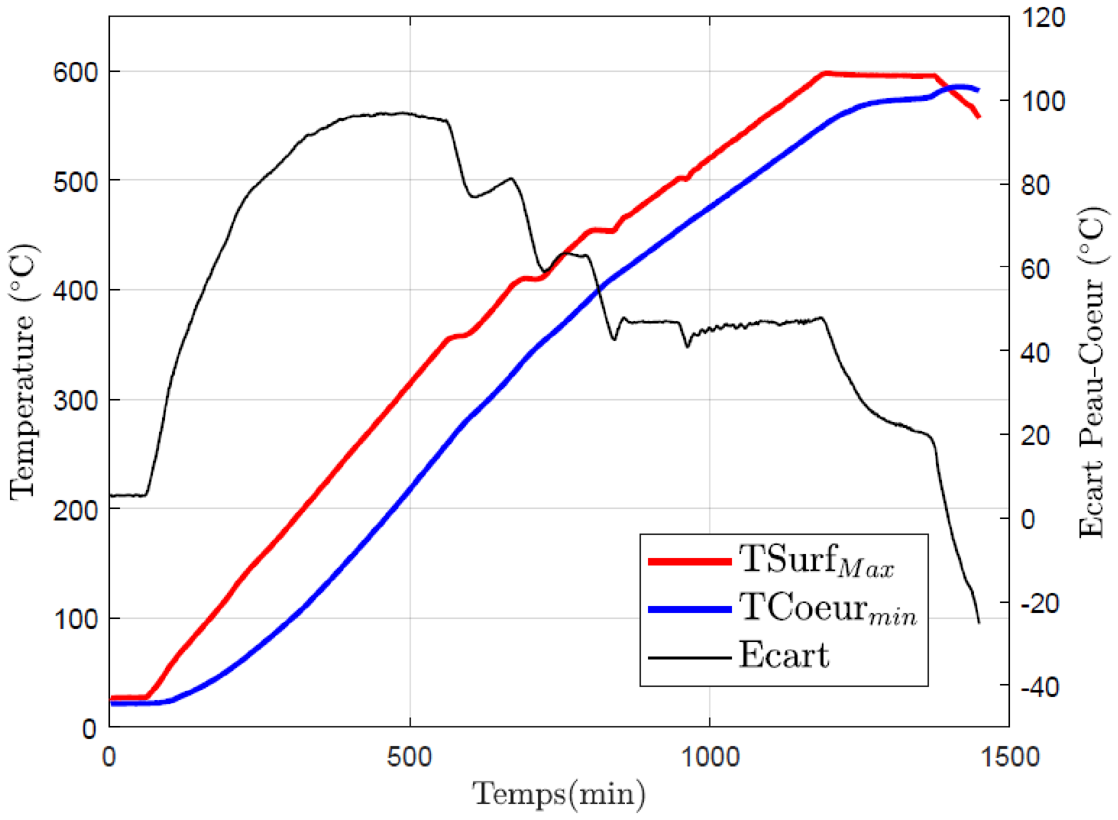






COMPRÉHENSION GLOBALE DU SYSTÈME { FOUR + CHARGE }

ANALYSE D'UN CYCLE DE BRASAGE (CHAUFFE EN PARTICULIER)



Courbes enveloppes standard pour un cycle de brasage (échangeur n°1697-3)

- Variables de contrôle :
  - Température de surface (de peau) maximale à chaque instant :

    $$TSurf_{Max}(t)$$

  - Vitesse de montée de la température maximale en peau :

    $$dTSurf_{Max}/dt$$

  - Écart maximal entre la peau et le cœur :

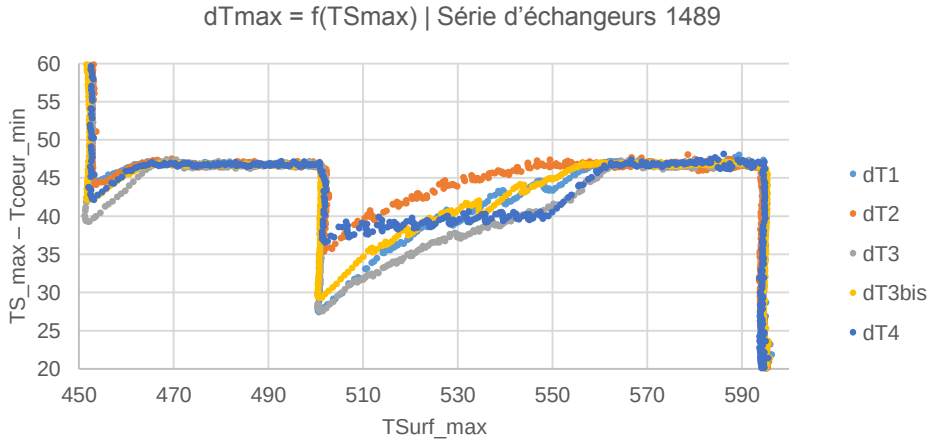
    $$dTmax = TSurf_{Max} - TCoeur_{min}$$

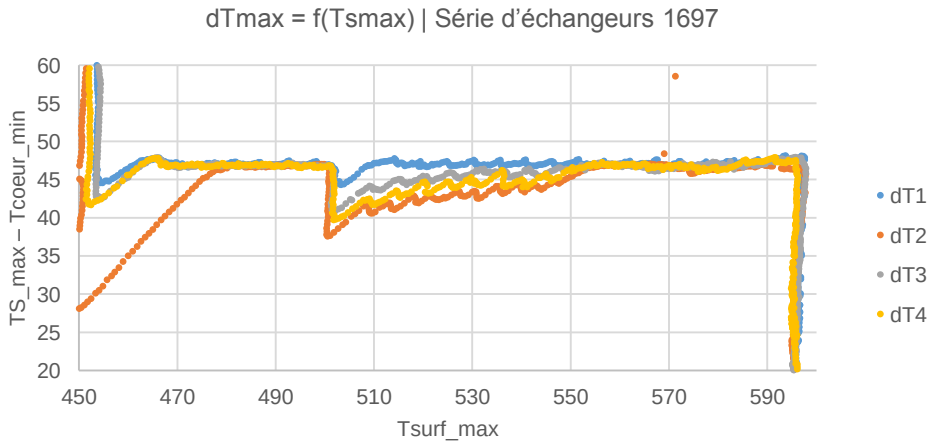
  - Niveau de vide dans l'enceinte

- Paramètres de brasage

COMPRÉHENSION GLOBALE DU SYSTÈME { FOUR + CHARGE }

ÉTUDE DE LA REPRODUCTIBILITÉ D'UN CYCLE





Écart cœur-peau en fonction de TSmax pour deux séries d'échangeurs

Étude sur la reproductibilité d'un cycle (avril/mai 2017)

- Sensibilité du cycle :
  - à l'instrumentation
  - au placement de l'échangeur dans le four
  - à l'application du noir de fumée en surface

Formalisation de critères de comparaisons quantitatifs difficile :

- Entre deux cycles aboutissant à des matrices saines
- Pour discriminer un cycle donnant une matrice défectueuse
  - → Critères trop macroscopiques (la régulation amène « globalement » la charge au palier de brasage)
  - → Détection de forts gradients locaux pendant la chauffe non systématique

MODÈLES PARAMÉTRIQUES
ESTIMATION DES COEFFICIENTS a_i ET b_i : PRINCIPE

Modèles autorégressifs :

Structure des modèles ARX :

$$y(t_i) = -\sum_{j=1}^{n_a} a_j y(t_i - j\Delta t) + \sum_{j=1}^{n_b} b_j u(t_i - j\Delta t - n_k \Delta t) + \epsilon(t_i)$$

Inversion linéaire possible en moindres carrés ordinaires

Vecteur paramètre :

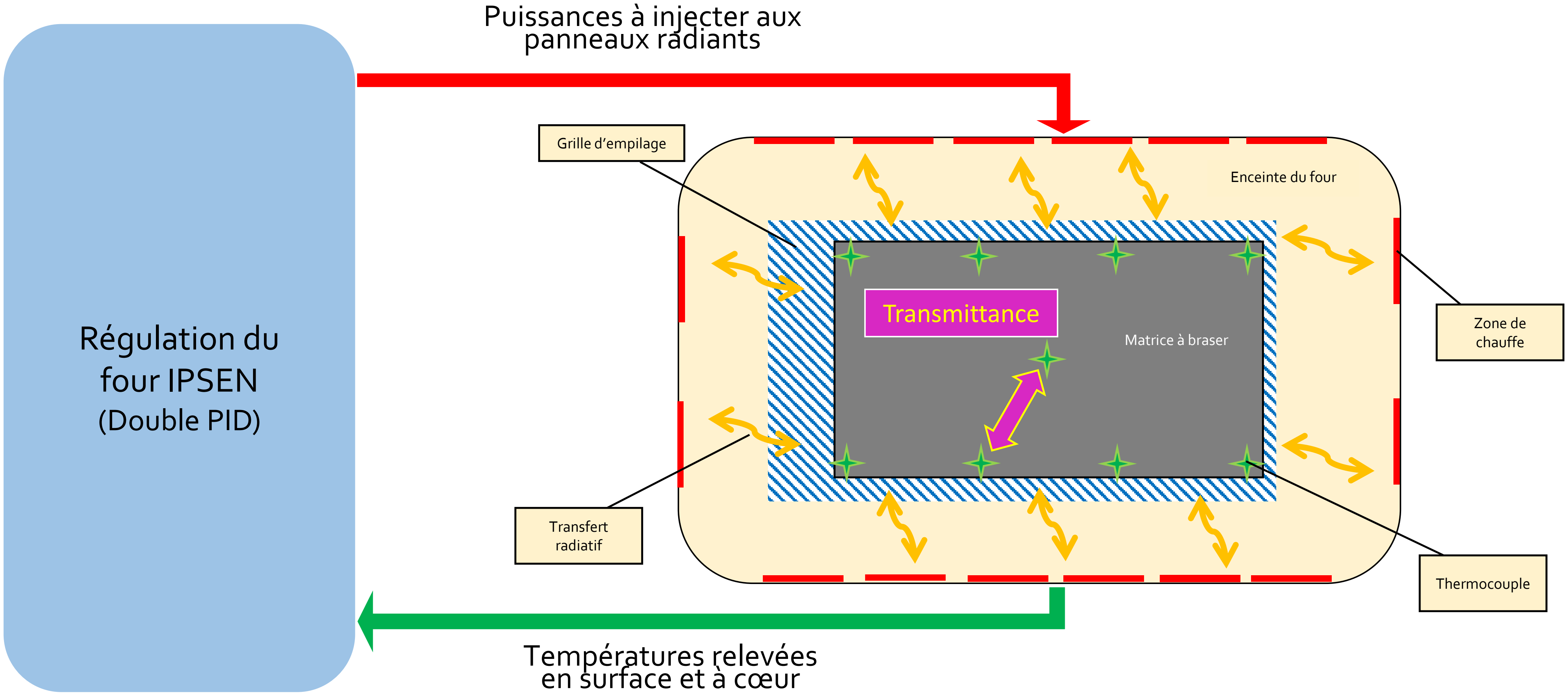
$$\mathbf{\Theta} = [a_1 \quad \cdots \quad a_{n_a}\; b_1 \quad \cdots \quad b_{n_b}]^T$$

Estimateur : $\widehat{\mathbf{\Theta}} = \left(\boldsymbol{J}^{\boldsymbol{T}}\,\boldsymbol{J}\right)^{-1}\boldsymbol{J}^{\boldsymbol{T}}\,\mathbf{Y}^{\mathbf{exp}}$

Avec : $\mathbf{Y}^{\mathbf{exp}} = [y_2 \quad \cdots \quad y_m\,]^T$ et $\boldsymbol{J}$ la matrice de sensibilité du système

Régularisation possible (QR ou TSVD)

MODÈLES PARAMÉTRIQUES
TRANSMITTANCE ***PEAU / CŒUR***

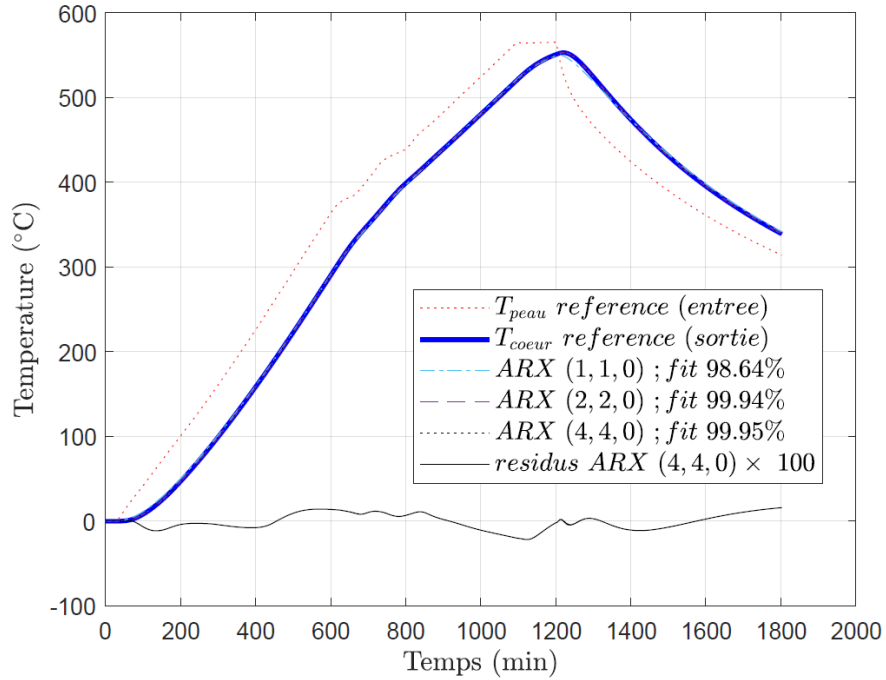


MODÈLES PARAMÉTRIQUES
*TRANSMITTANCE **PEAU / CŒUR***
(AU SEIN DE LA CHARGE)

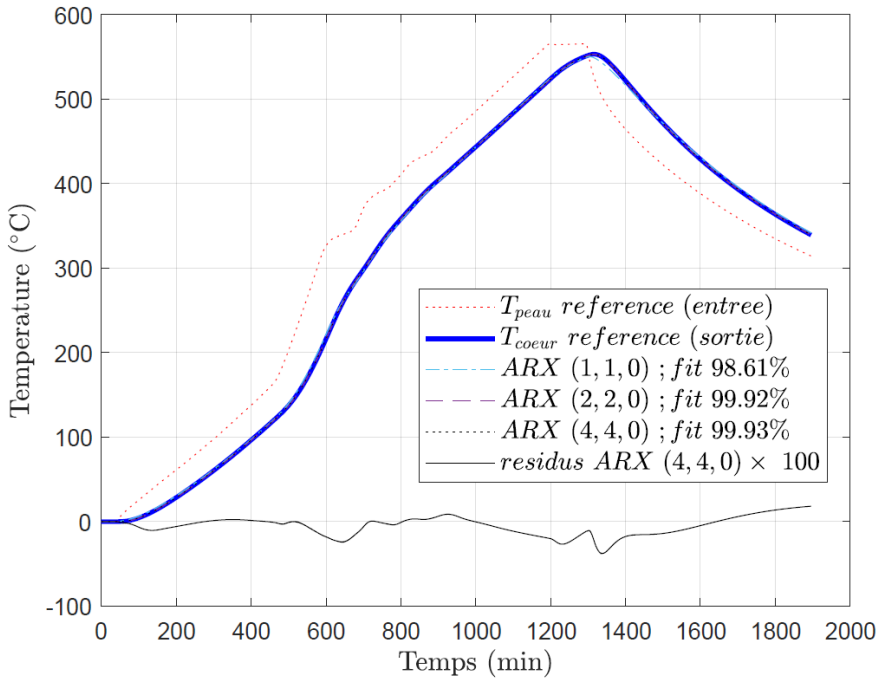
Résultats sous forme de courbes et de pourcentage d'ajustement :

$$fit = 100 \times \left(1 - \frac{\|\boldsymbol{Y^{exp}} - \boldsymbol{Y^{mo}}\|}{\|\boldsymbol{Y^{exp}} - mean(\boldsymbol{Y^{exp}})\|}\right)$$

Origine des données initiales : SIMFURNACE



Estimation (calibration) de trois modèles pour la transmittance Peau-Coeur



Validation des modèles estimés avec une autre sollicitation pour la même transmittance

MODÈLES PARAMÉTRIQUES

TRANSMITTANCE ***PANNEAU / PEAU***

(COUPLAGE ENTRE LE FOUR ET LA CHARGE)

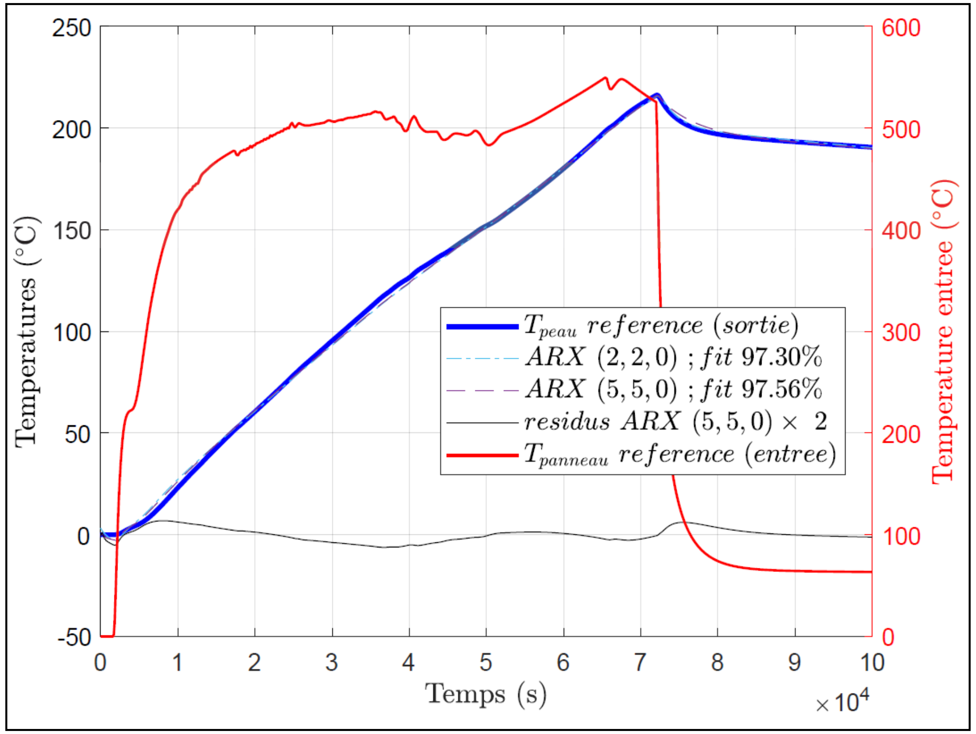
Etude intermédiaire en linéarisant le flux radiatif :

Modèles convenablement estimés et validés

$$\phi_{ij} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1} = \frac{\sigma(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1}(T_i - T_j) \overset{\text{linéarisation}}{\simeq} \frac{4\sigma T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1}(T_i - T_j)$$

Étude avec un flux radiatif NON linéarisé

Modèles convenablement estimés *a priori*



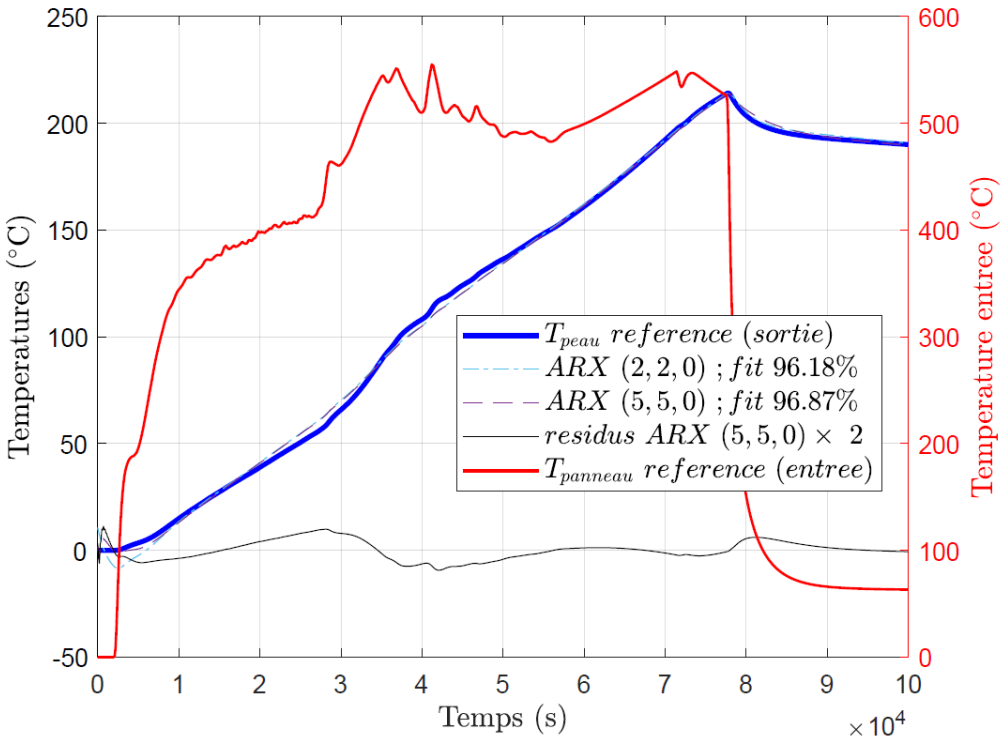
Estimation (calibration) de deux modèles pour la transmittance Panneau-Peau (flux NON linéarisé)

MODÈLES PARAMÉTRIQUES
*TRANSMITTANCE **PANNEAU / PEAU***
(COUPLAGE ENTRE LE FOUR ET LA CHARGE)

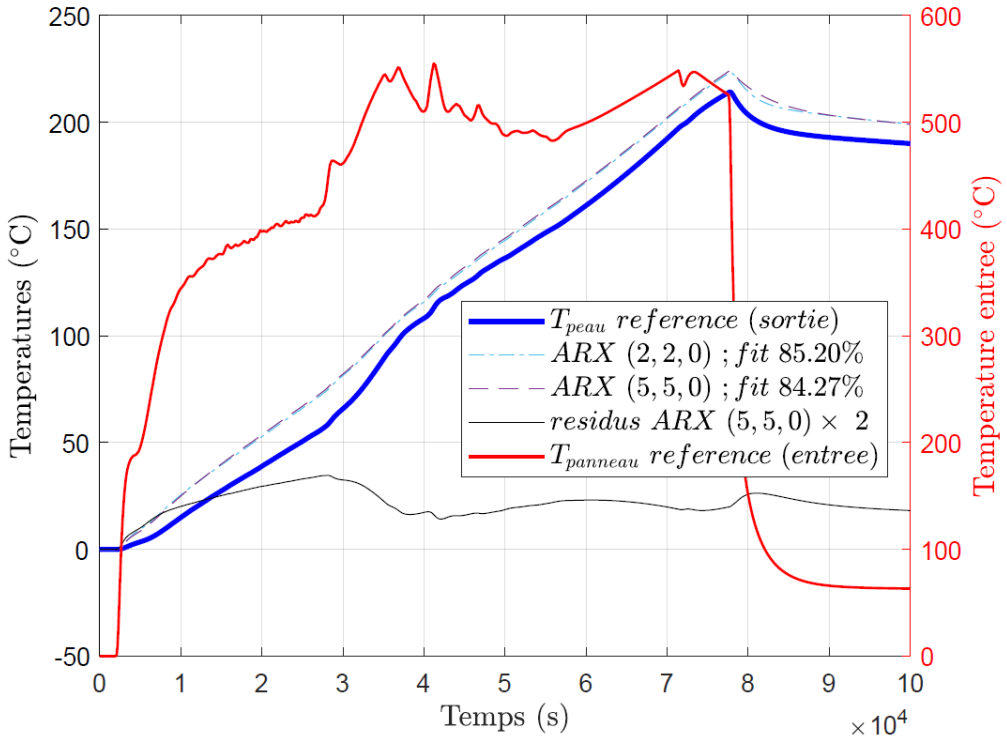
Estimation des **Conditions Initiales supplémentaires** sous Matlab (vecteur constant)

→ amélioration de l'ajustement des modèles aux données cible

→ comment intégrer cette constante dans les modèles et comment la prédire ?

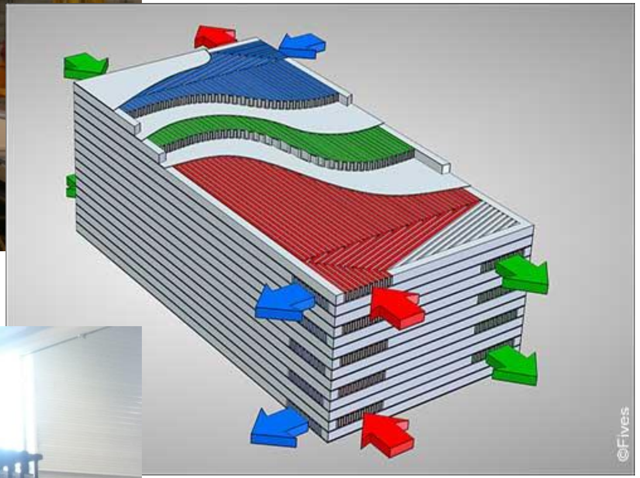


Validation de deux modèles pour la transmittance Panneau-Peau (flux NON linéarisé) **AVEC estimation des C.I**



Validation de deux modèles pour la transmittance Panneau-Peau (flux NON linéarisé) **SANS estimation des C.I**

POSITIONNEMENT
LES ÉCHANGEURS À PLAQUES BRASÉES



Échangeurs thermiques à plaques et ondes brasées :

- Application : traitement de fluides cryogéniques
- Géométrie parallélépipédique de structure interne et dimensions très variables
  $$\sim 1m \leq longueur \leq \sim 7m$$
- Récapitulatif des étapes de fabrication des échangeurs avant brasage

EMPILAGE → NOIRCISSEMENT → PERÇAGE & INSTRUMENTATION → ENFOURNEMENT & CONNEXION DES TC AUX BORNIERS → BRASAGE