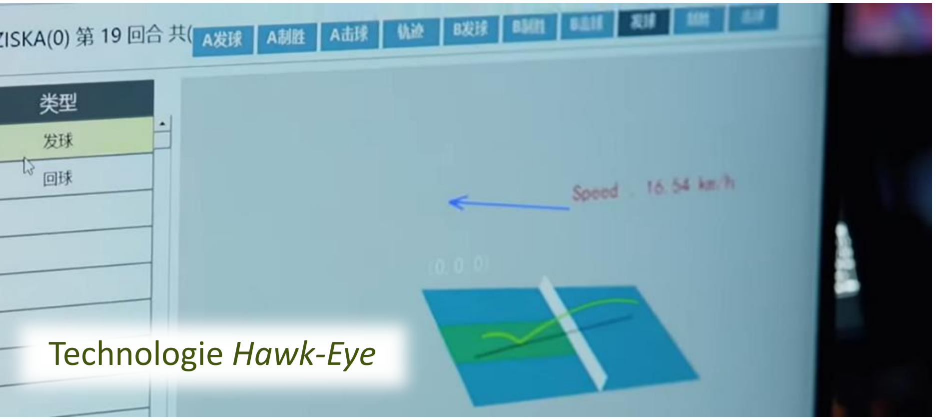
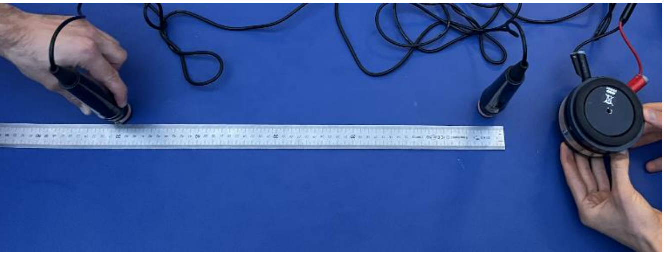
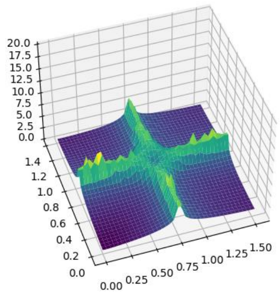
# TIPE - SPORTS ET JEUX

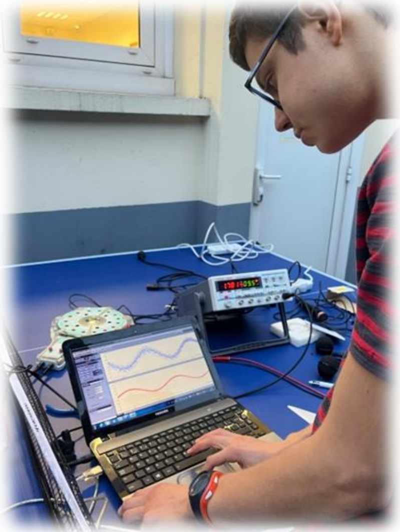
Bastien AVRILLON 38901




Technologie *Hawk-Eye*





# LOCALISATION DES IMPACTS D’UNE BALLE

AU COURS D’UN JEU DE TENNIS DE TABLE

- PROBLÉMATIQUE RETENUE –

# Quelles caractéristiques de la propagation d'ondes acoustiques dans une table de tennis de table sont les plus déterminantes pour calculer la position de l'impact d'une balle ? Que peut-on en déduire quant à la conception d'un système instrumental précis de calcul de position d'impact ?

# DÉROULÉ DE LA PRÉSENTATION

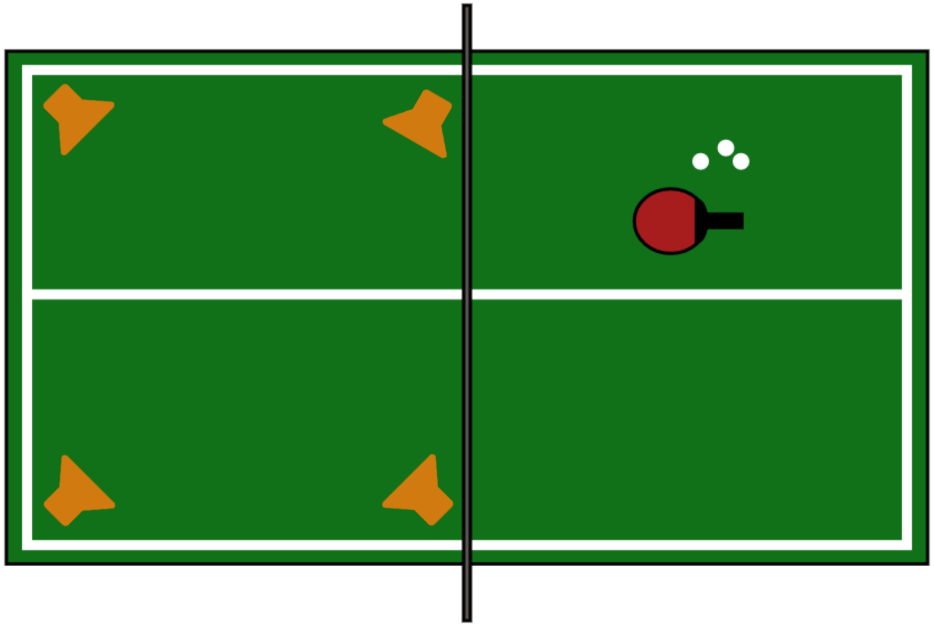
- Procédé de localisation utilisé
- Mise en œuvre concrète de l'acquisition et amélioration du signal
- Mesure expérimentale de la célérité du son et Méthodes détection des instants d'arrivée
- Analyse critique des résultats expérimentaux

— I —

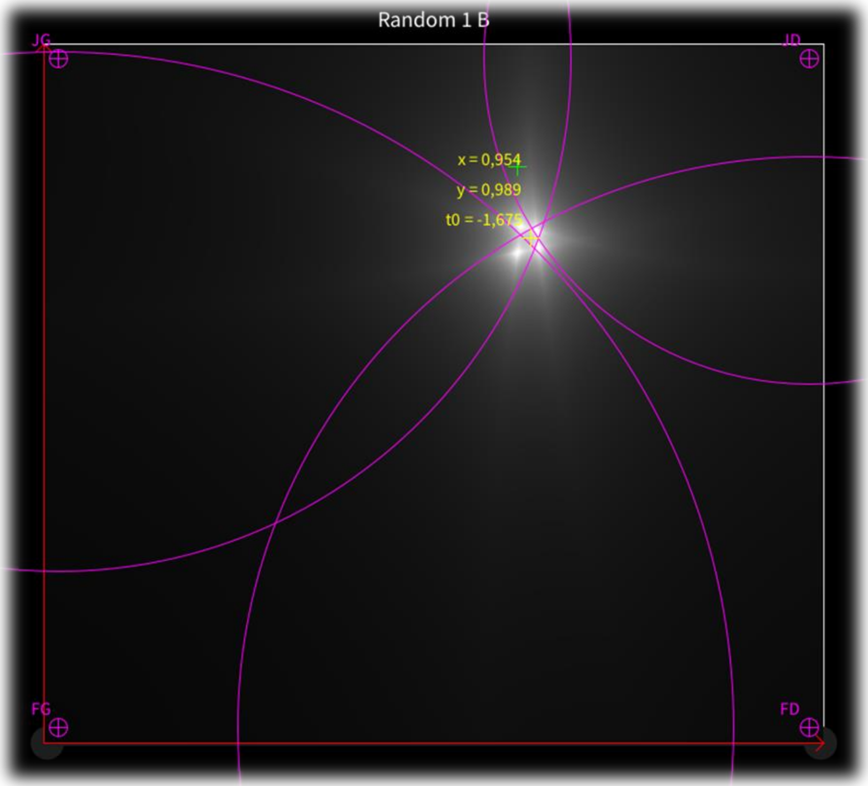
# LE PROCÉDÉ DE LOCALISATION UTILISÉ

# PROCÉDÉ DE LOCALISATION UTILISÉ

- Exploitations des **ondes acoustiques** se propageant à l'**intérieur** de la table
- Méthode de **Différence de Temps d'Arrivée** (TDoA), résolution **numérique** (méthode de Newton)



Placement des microphones sur la table de ping-pong




Programme développé pour calculer les positions par TDoA

– II –

# MISE EN ŒUVRE CONCRÈTE DE L’ACQUISITION ET AMÉLIORATION DU SIGNAL

# CONCEPTION DES CAPTEURS SONORES

- **Exigences** :
  - Exploitation par le microcontrôleur
  - Eviter la saturation
  - Directionnalité carioïde
  - Isolation phonique
  - Blindage et gaine contre le bruit électromagnétique


MAX9814 (microphone à gain réglable utilisé)

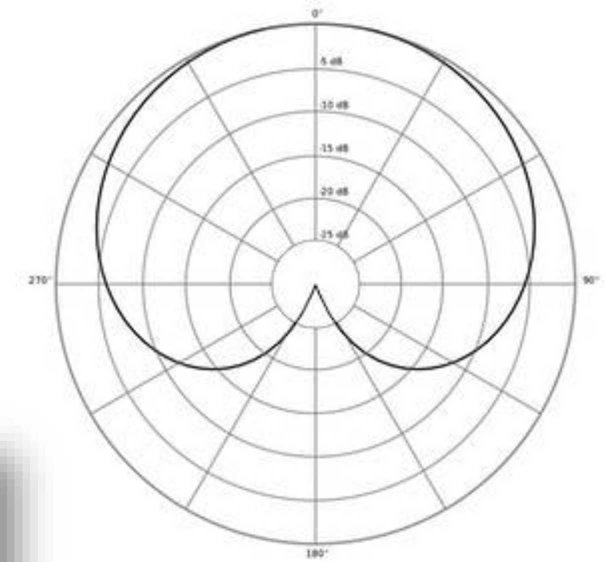
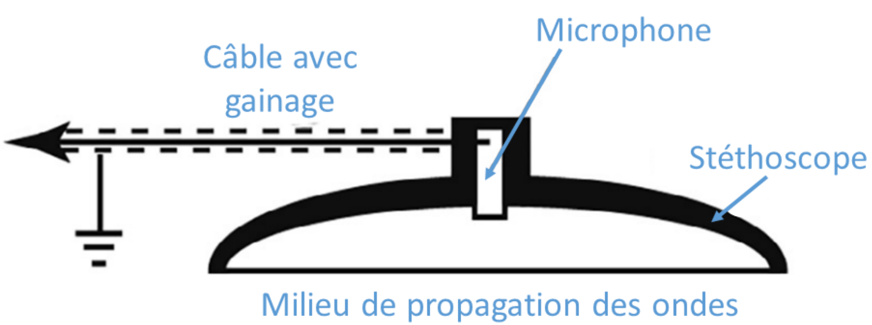
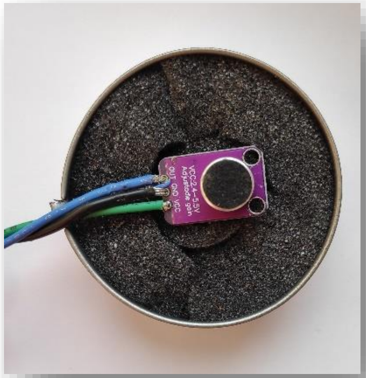
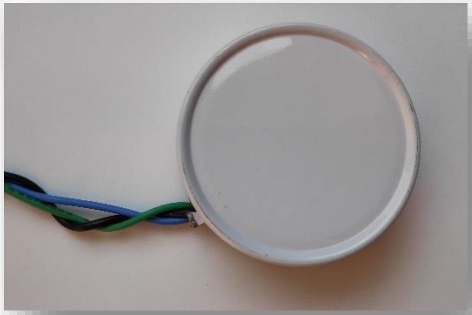



Diagramme polaire de réponse du microphone : cardioïde




Microphone « *stethoscope* » (*Applied Acoustics 195*)

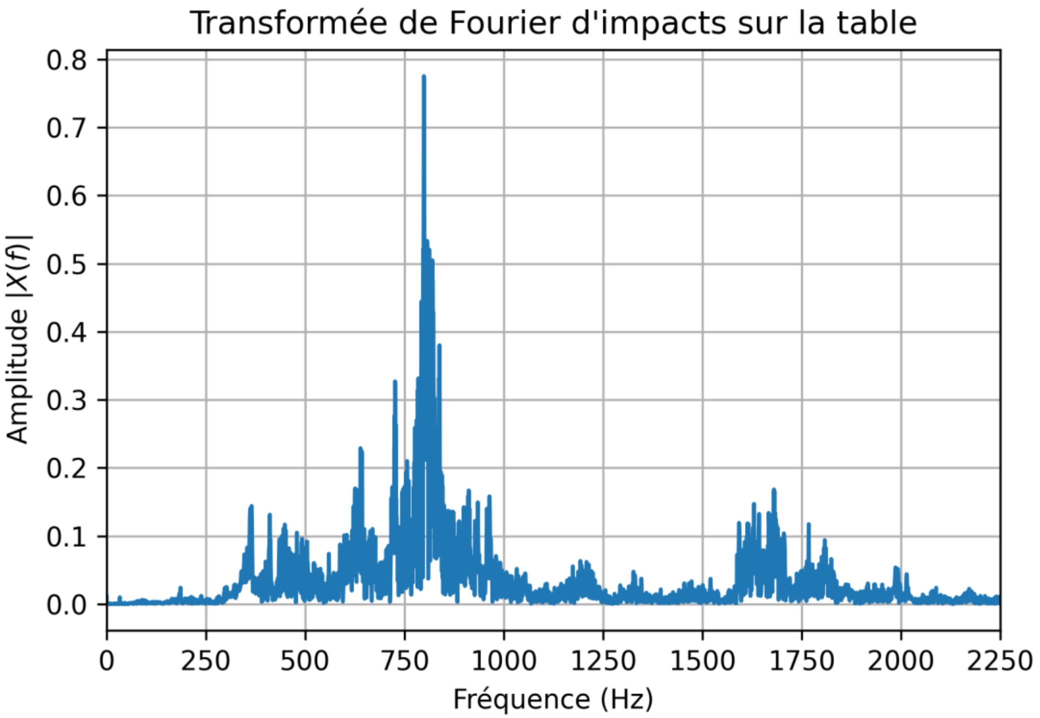




Les capteurs conçus

# FILTRAGE NUMÉRIQUE

- **Etude fréquentielle** (transformée de Fourier avec réalisée avec *Numpy*) :
  - Contenu spectral important autour de $f$ = **785 Hz**
- **Filtrage passe-bande**, par un filtre **numérique** :
  - Faible coût algorithmique
  - Signal in fine numérique
  - Caractéristiques du filtre :
    - $f_0 = 185$ Hz
    - $Q = 10$
    - $T_e = 15$ µs



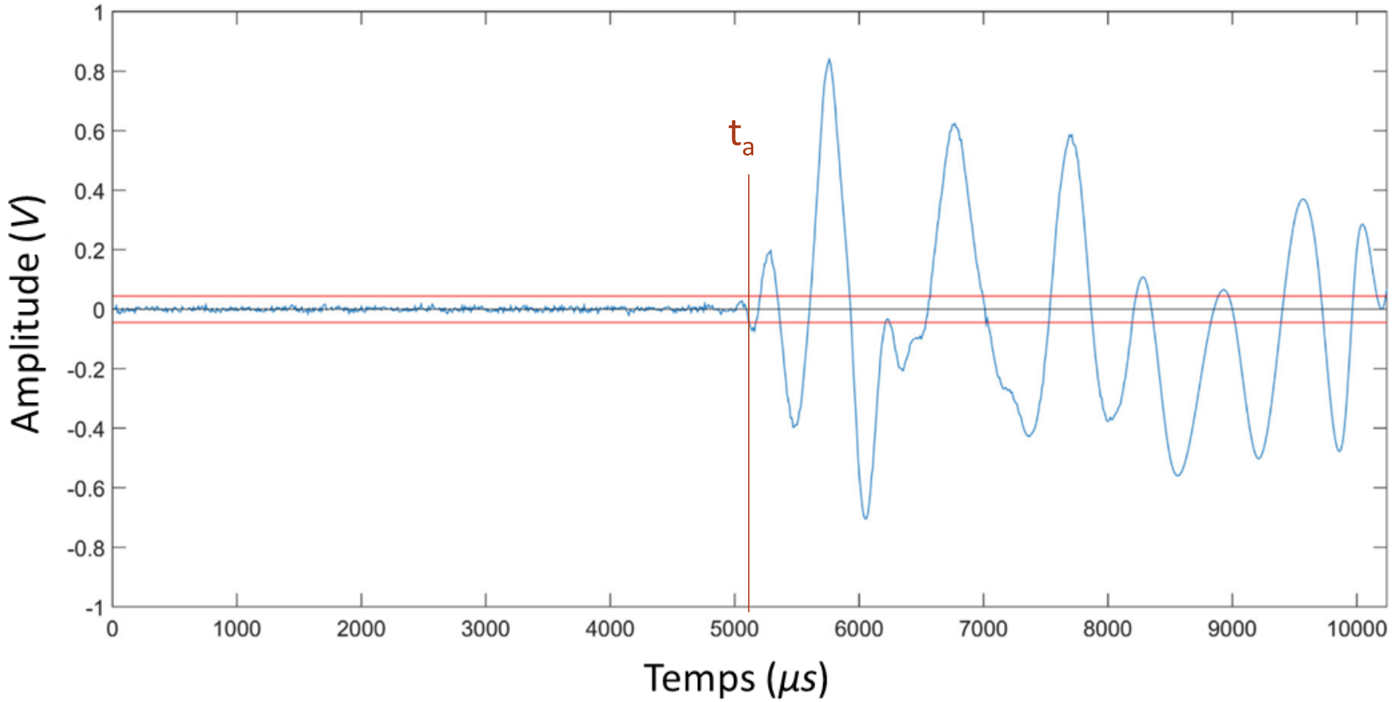
— III —

# MESURE EXPÉRIMENTALE DE LA CÉLÉRITÉ DU SON ET MÉTHODES DE CALCUL DES POSITIONS

# CALCUL DES INSTANTS D'ARRIVÉE

## MÉTHODE « *6-SIGMAS* »

- Utilisation d'un seuil relatif à la moyenne du signal :
  - Etablissement du seuil selon la moyenne du bruit sans perturbation
  - Valeur du seuil : 6 écarts-types par rapport à la moyenne (meilleurs résultats expérimentaux)



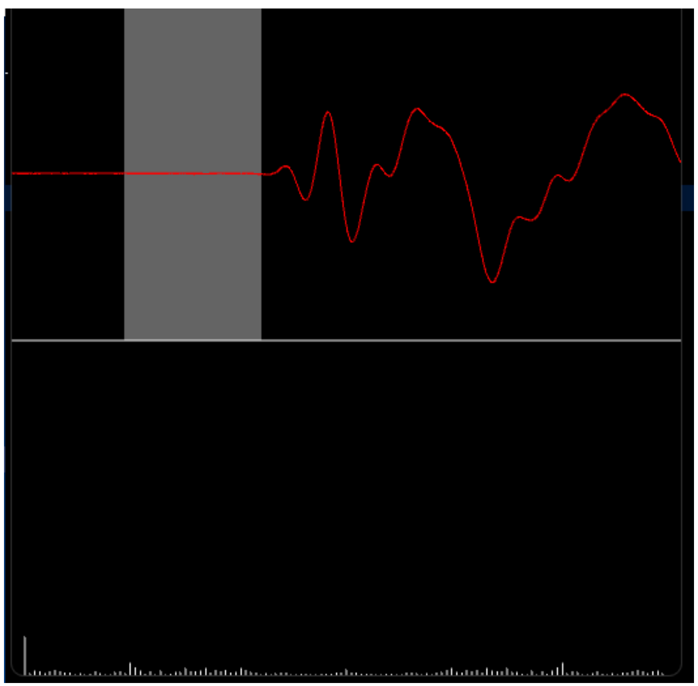

Seuil établi sur un des signaux captés :

**instant d'arrivée de l'onde ($t_a$) = instant de franchissement du seuil**

# CALCUL DES INSTANTS D'ARRIVÉE

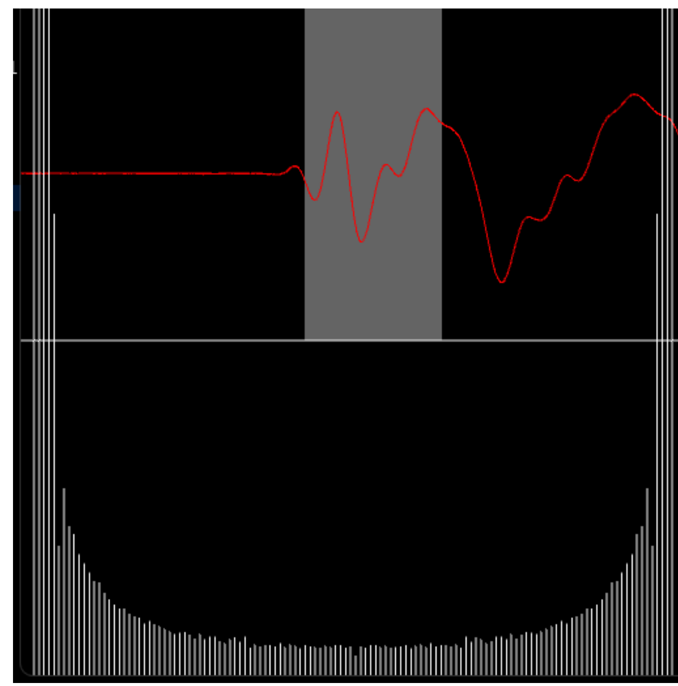
## MÉTHODE *FBE* (*Energie des Bandes de Fréquences*)

- Exploitation de la **répartition fréquentielle de l’énergie** véhiculée par l’onde :
  - Isolement d’une fenêtre temporelle du signal
  - Transformées de Fourier rapide



FFT réalisée **avant** l’arrivée de l’onde au niveau du capteur

FFT réalisée **après** l’arrivée de l’onde au niveau du capteur



# CALCUL DES INSTANTS D'ARRIVÉE

## MÉTHODE *FBE* (*Energie des Bandes de Fréquences*)

- Exploitation de la **répartition fréquentielle de l'énergie** véhiculée par l'onde :
  - Isolement d'une fenêtre temporelle du signal
  - Transformées de Fourier rapide
  - Rapport de la bande d'énergie

    (utilisation du déséquilibre fréquence/amplitude)

$$R_{FBE} = \log \frac{Energie_{BF}}{Energie_{HF}}$$

Exemple de la fonction corrélation de 3 capteurs pour un même impact

# CÉLÉRITÉ DES ONDES SONORES

## CALCUL THÉORIQUE : MODÈLE DE PROPAGATION

- Approximation acoustique :
  - Hypothèse des petits mouvement (l'onde est une perturbation)
  - Phénomènes dissipatifs négligés (évolution isentropique)
  - Pesanteur négligée
  - Approximation
- Equation de propagation d'Alembert :

  c = célérité de l'onde dans le milieu

$$\boxed{\Delta p = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial^2 t}}$$

$$\boxed{c = \frac{1}{\sqrt{\mu\,\chi_s}}}$$

- $\chi_s$ = coefficient de compressibilité isentropique du matériau
- μ = masse volumique du matériau (en $kg \cdot m^{-3}$)

  Expérimentalement : $\mu = 1{,}438 \times 10^3\ kg \cdot m^{-3}$

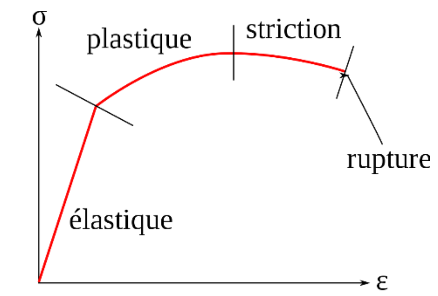
- Absence de données tabulées concernant le matériau de la table

  (plateau en bois aggloméré ou en résine stratifiée)

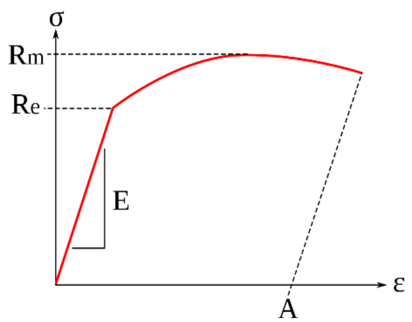
# CÉLÉRITÉ DES ONDES SONORES

## THÉORIE DE L'ONDE À L'INTERFACE

- Loi de Hooke : $\boxed{\sigma = \varepsilon . E}$
  - $\sigma$ = contrainte de traction appliquée (en $Pa$)
  - $\varepsilon$ = allongement relatif (adimensionné)
  - $E$ = module d'Young (en $Pa$)




Linéariser la courbe σ = f(ε) dans la **zone d'élasticité** du matériau pour déduire E de sa pente



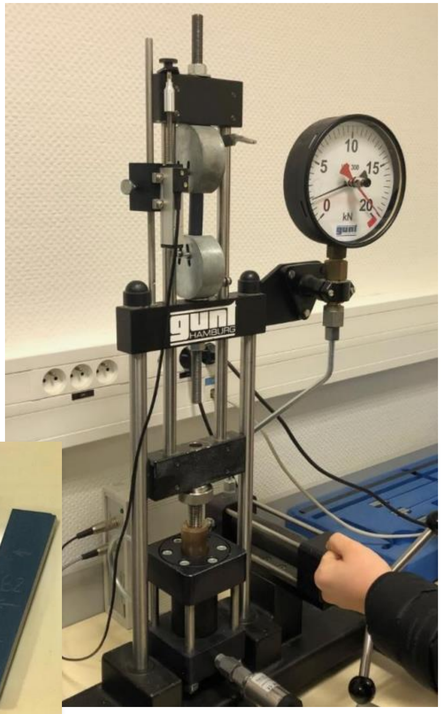

- $\boxed{c = \sqrt{\frac{E}{\mu}} = \sqrt{\frac{\sigma}{\mu\varepsilon}}}$
  - c = célérité de l'onde dans le matériau (en $m \cdot s^{-1}$)
  - µ = masse volumique du matériau (en $kg \cdot m^{-3}$)

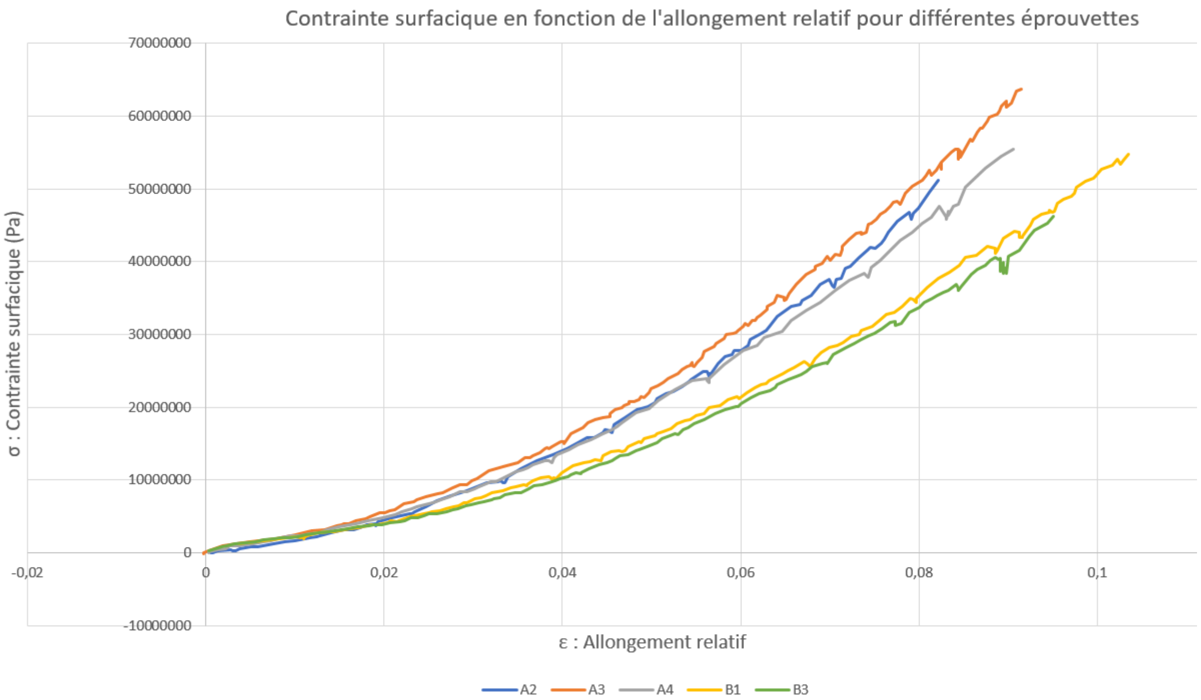
Expérimentalement : $\mu = 1{,}438 \times 10^3 \; kg \cdot m^{-3}$

# CÉLÉRITÉ DES ONDES SONORES

## MESURE DU MODULE D'YOUNG DU MATÉRIAU

- Obtention d'échantillon de la **résine stratifiée** utilisée auprès d'un industriel
- Utilisation du banc d'essai de traction



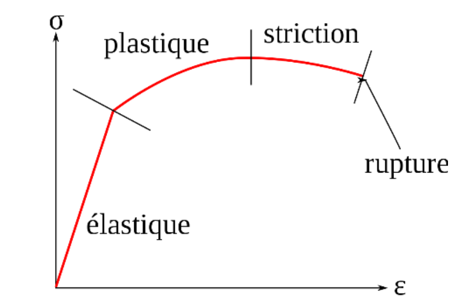

Mesure de l'allongement relatif en fonction de l'effort appliqué sur les éprouvettes

Valeur de la célérité : $\mathbf{C_{son\,1}} = (3420 \pm 33)\ m \cdot s^{-1}$

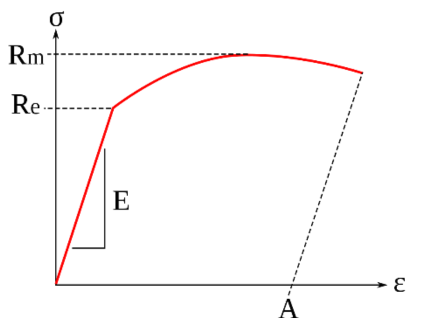
# CÉLÉRITÉ DES ONDES SONORES

## CALCUL THÉORIQUE : MODULE D'YOUNG

- Loi de Hooke : $\boxed{\sigma = \varepsilon . E}$
  - $\sigma$ = contrainte de traction appliquée (en $Pa$)
  - $\varepsilon$ = allongement relatif (adimensionné)
  - $E$ = module d'Young (en $Pa$)




Linéariser la courbe σ = f(ε) dans la **zone d'élasticité** du matériau pour déduire E de sa pente




- $$\boxed{c = \sqrt{\frac{E}{\mu}} = \sqrt{\frac{\sigma}{\mu\varepsilon}}}$$
  - c = célérité de l'onde dans le matériau (en $m \cdot s^{-1}$)
  - μ = masse volumique du matériau (en $kg \cdot m^{-3}$)

Expérimentalement : $\mu = 1{,}438 \times 10^3\ kg \cdot m^{-3}$

- Ordre de grandeur disponible :
  - Bois aggloméré : $E = 13\ GPa$ donc $c = 3,0\ \times 10^3\ m \cdot s^{-1}$

# CÉLÉRITÉ DES ONDES SONORES

## MESURE DU TEMPS DE PARCOURS DE L'ONDE

- Vingtaine d'impacts, mesure de leur distance au capteur et du retard de l'onde
- Régression linéaire d = f(t)

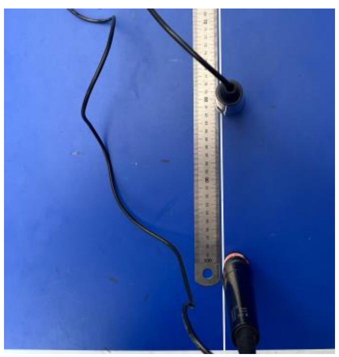
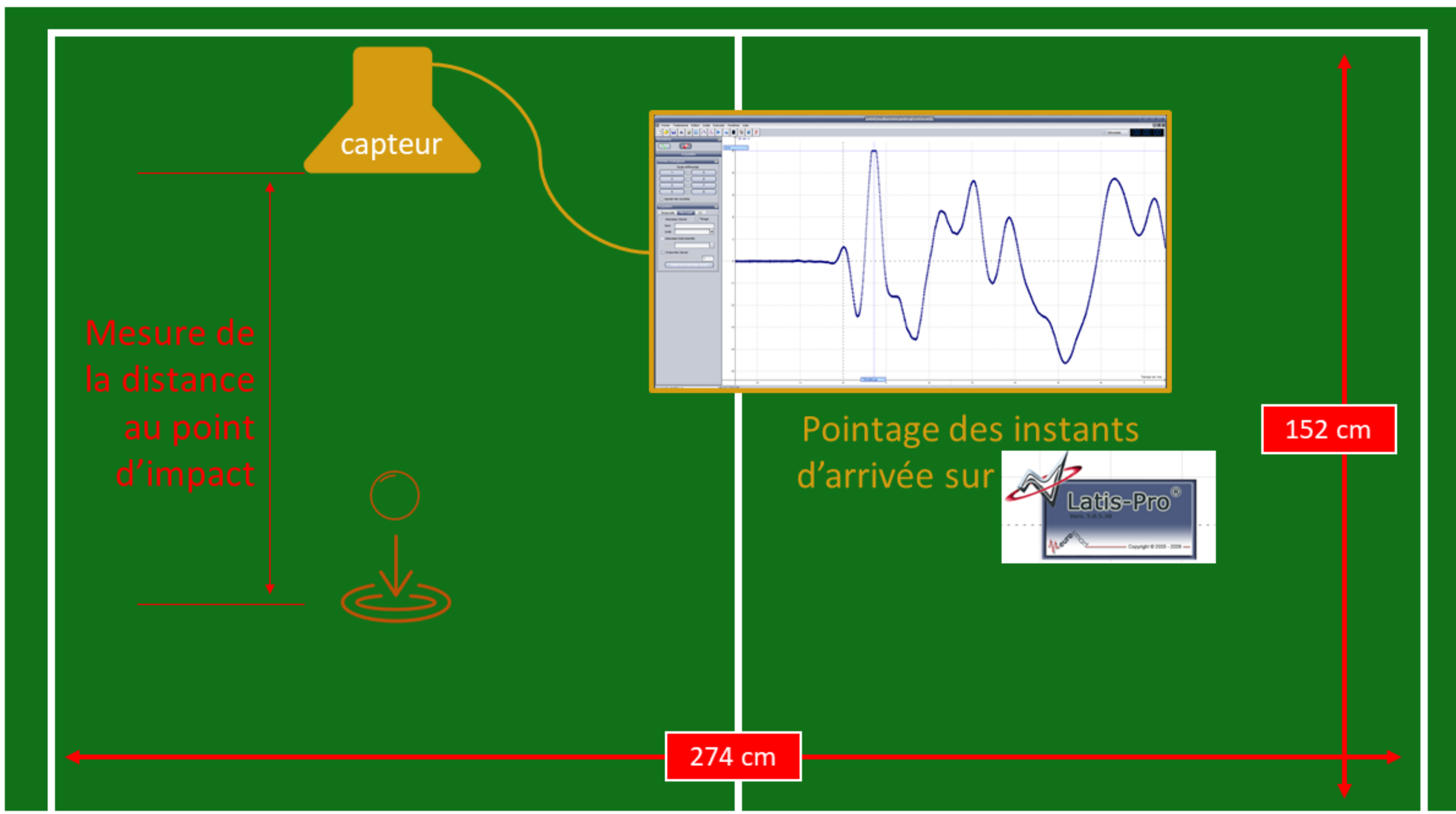


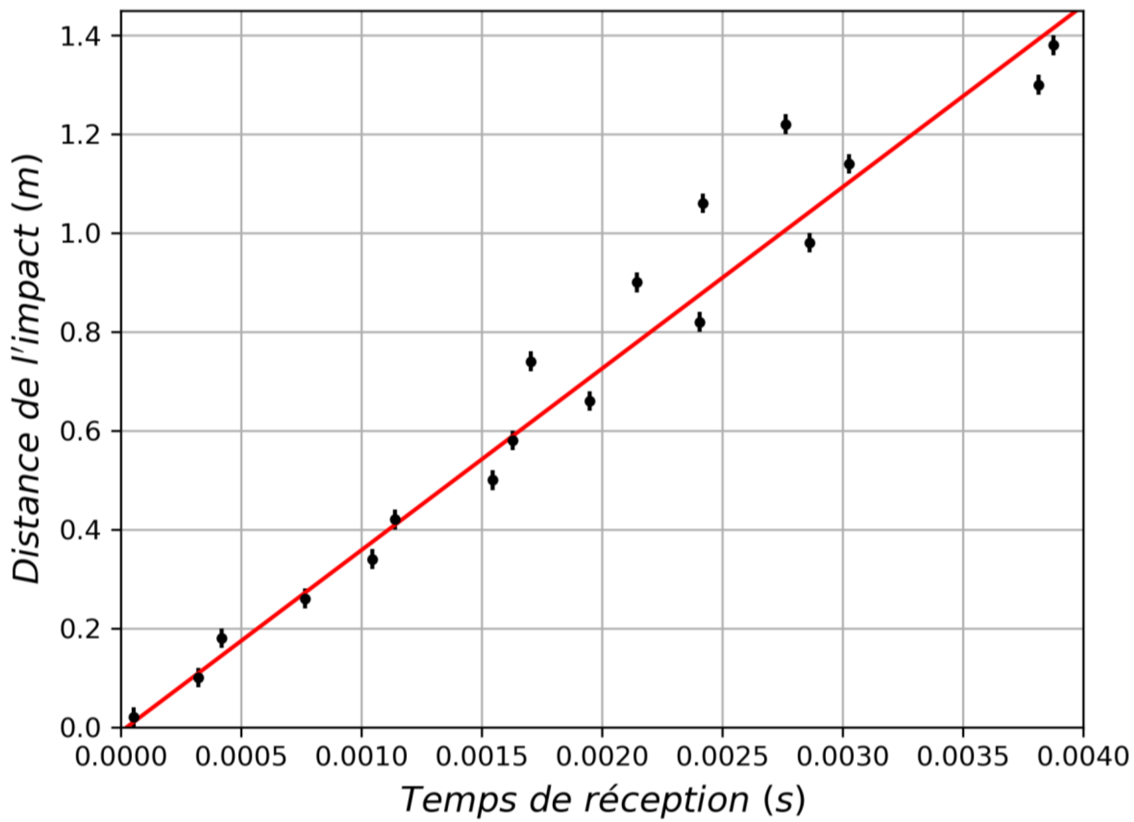
Schéma du dispositif de mesures



# CÉLÉRITÉ DES ONDES SONORES

## MESURE DU TEMPS DE PARCOURS DE L'ONDE

- Vingtaine d'impacts, mesure de leur distance au capteur et du retard de l'onde
- Régression linéaire d = f(t)
- Méthode de Monte-Carlo (pour les incertitudes)




Valeur de la célérité :

$\mathbf{C}_{\mathbf{son}\ 2} = (\,367 \pm 4{,}3)\ m \cdot s^{-1}$

Régression linéaire et méthode de Monte-Carlo (réalisées avec Numpy)

- Précision insuffisante des positions calculées en utilisant la valeur obtenue

# CÉLÉRITÉ DES ONDES SONORES

## THÉORIE DE LA PROPAGATION À L'INTERFACE

**AIR**

Onde plane progressive **INCIDENTE**

$v_i\ ;\ P_i = +Z_{air} \cdot v_i$

Onde plane progressive **RÉFLÉCHIE**

$v_r\ ;\ P_r = -Z_{air} \cdot v_r$

$$Z_{air} = c_{air} \cdot \mu_{air}$$

$$Z_{air} = 343 \times 1{,}19 = 4{,}08 \times 10^2\ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$$

**TABLE**

Onde plane progressive **TRANSMISE**

$v_t\ ;\ P_t = +Z_{table} \cdot v_t$

$$Z_{table} = c_{table} \cdot \mu_{table}$$

$$Z_{table} = 3420 \times 1438 = 4{,}92 \times 10^6\ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$$

$$\begin{cases} v_{i0} + v_{r0} = v_{t0} \\ P_{i0} + P_{r0} = P_{t0} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_{i0} + v_{r0} = v_{t0} \\ Z_{air} \cdot (v_{i0} - v_{r0}) = Z_{table} \cdot v_{t0} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \boxed{r_P = \frac{Z_{table} - Z_{air}}{Z_{table} + Z_{air}} = 1{,}00}$$

Coefficient de réflexion de l'onde de surpression à l'interface

# CÉLÉRITÉ DES ONDES SONORES

## DÉTERMINATION DU PARAMÈTRE NUMÉRIQUE

- **Objectif** : Obtenir une valeur du paramètre **$C_{son}$** saisie dans le programme de TDoA qui **maximise la précision** des localisations
- Valeur d'un paramètre, ie ne correspondant aucunement à une mesure physique de la grandeur **$C_{son}$**
- Détermination par la méthode des moindre carrés
- Réalisation d'une base de donnée :

55 impacts de coordonnées connues

Mesure des coordonnées puis enregistrement de l'impact par les microphones et le microcontrôleur

Valeur du paramètre retenue :
**$C_{son\ 3}$** = $(340 \pm 5)\ m \cdot s^{-1}$

– IV –

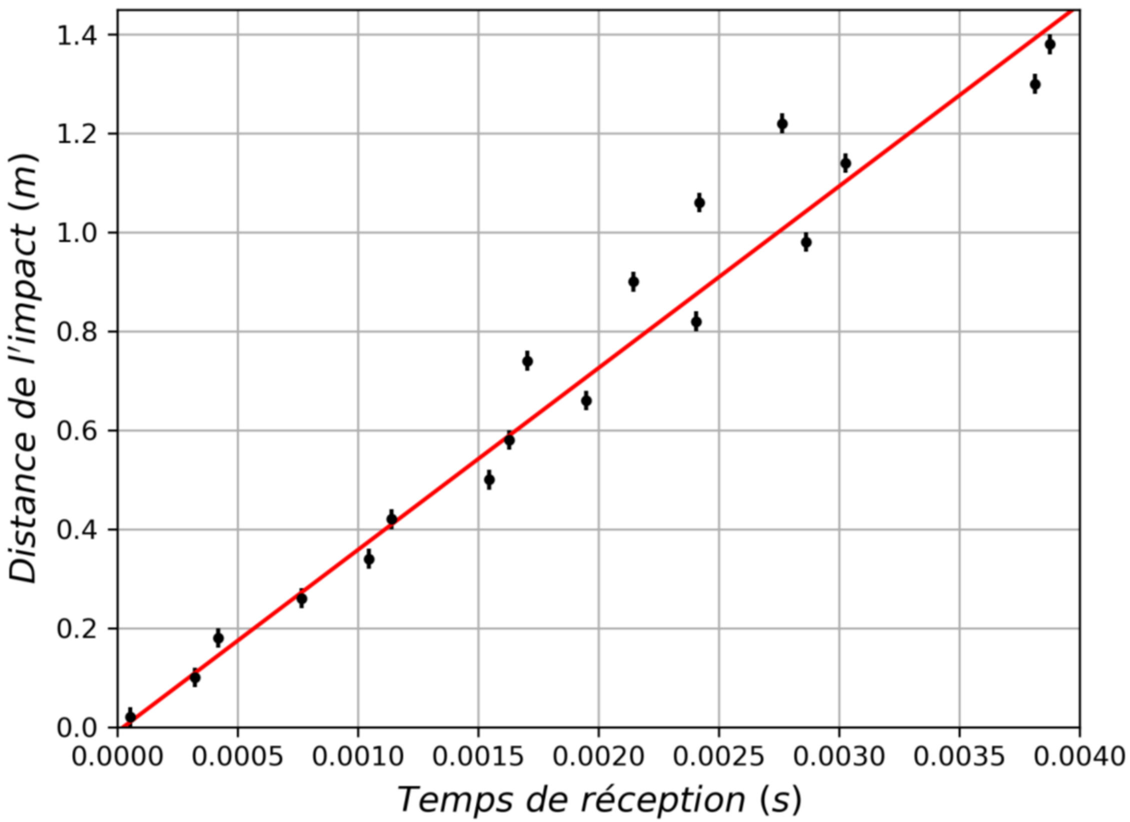
# ANALYSE CRITIQUE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

# ANALYSE CRITIQUE DES RÉSULTATS

## RÉGRESSION LINÉAIRE

- **Incertitudes expérimentales** ne permettant pas de valider le modèle linéaire
  - Pointage sur *LatisPro* avec réticule : 6 µs
  - Mesure des distances : 2 cm

Méthode de Monte-Carlo (réalisées avec Numpy)




- Hypothèse d'un **milieu dispersif** : invalidée

- Hypothèse d'existence d'**effets des bords**

Valeur de la célérité :

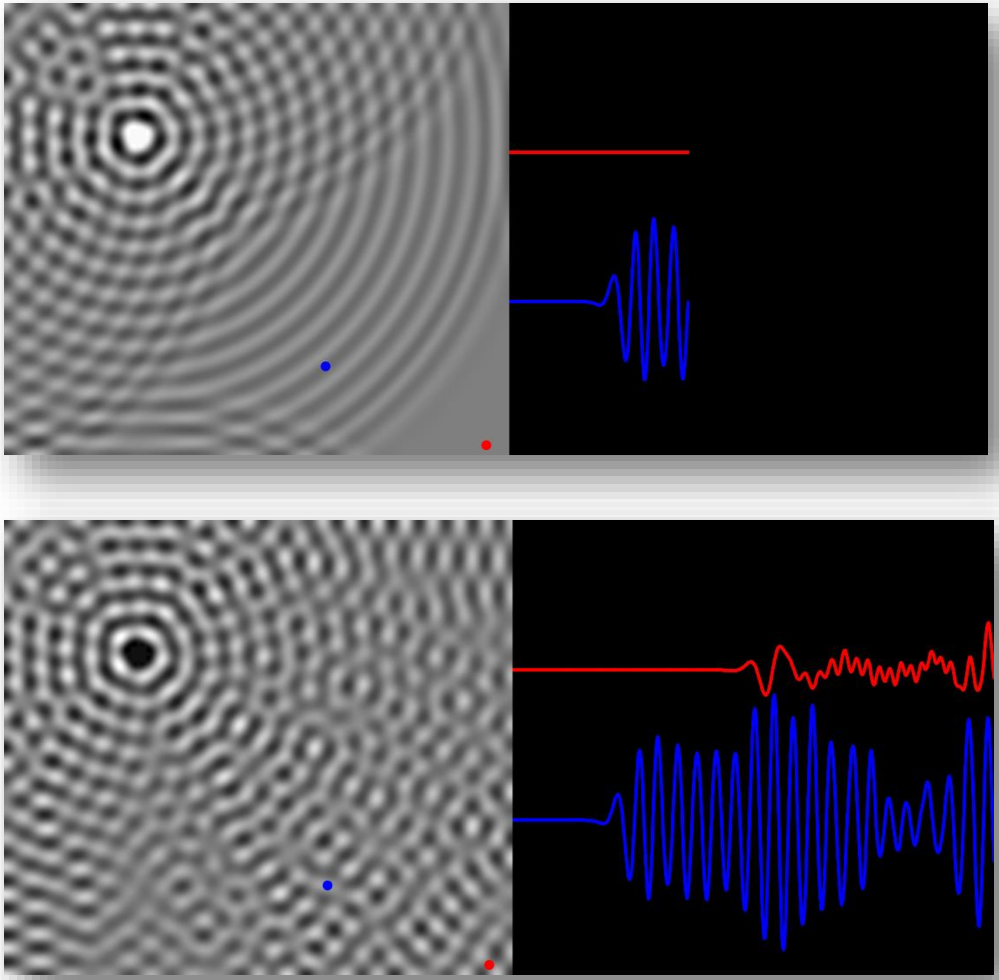
$\mathbf{C}_{\mathbf{son}\ 2} = (\,367 \pm 4{,}3)\ m \cdot s^{-1}$

# ANALYSE CRITIQUE DES RÉSULTATS

## EFFETS DE BORDS

- **Simulation numérique :**

Evolution temporelle de la propagation d’une onde 2D compte tenu des conditions aux limites (réflexion à l’interface table/air)



Simulations numérique des signaux captés en modélisant la réflexion de l’onde

# ANALYSE CRITIQUE DES RÉSULTATS

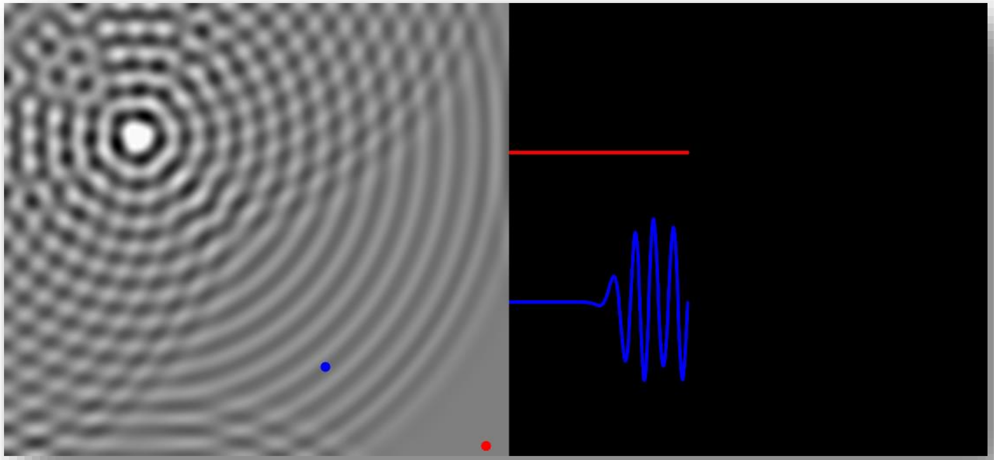
## EFFETS DE BORDS

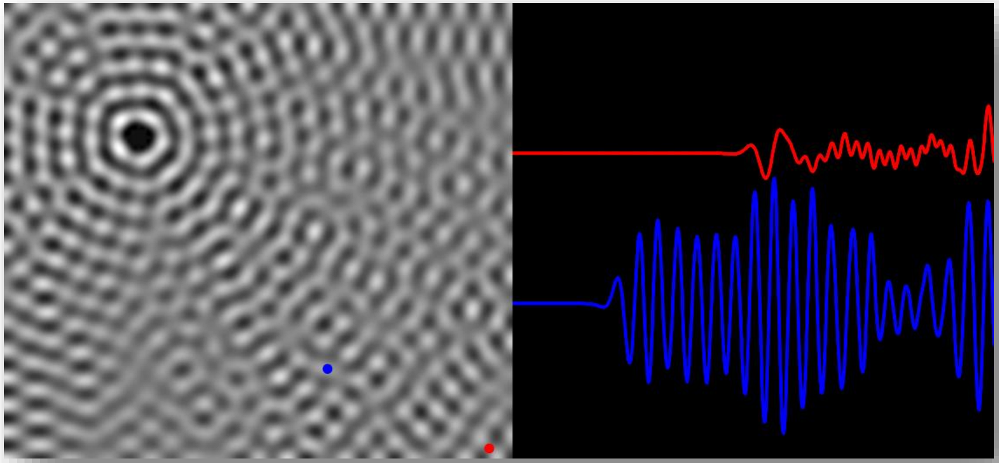
- **Simulation numérique :**

Evolution temporelle de la propagation d'une onde 2D compte tenu des conditions aux limites (réflexion à l'interface table/air)

- Gain en précision lors de l'**éloignement des microphones** :

optimal à en 10 cm du bord



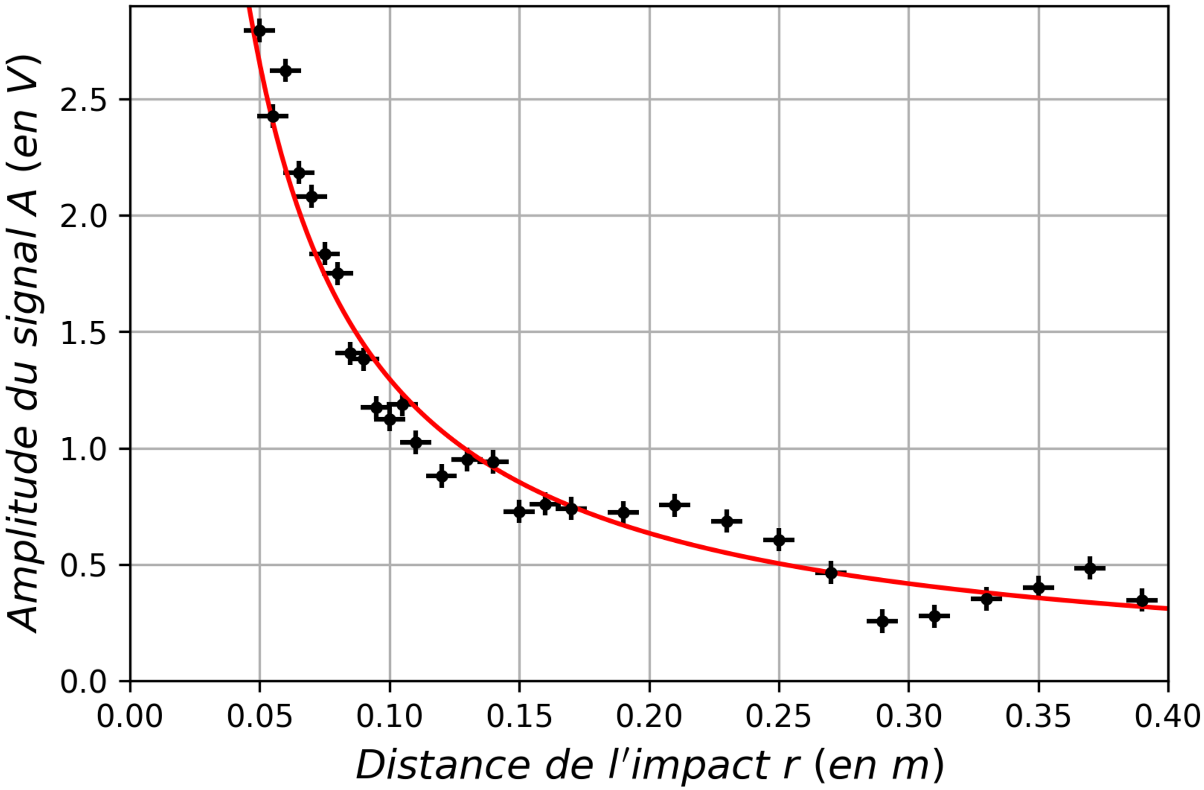


Simulations numérique des signaux captés en modélisant la réflexion de l'onde

# ANALYSE CRITIQUE DES RÉSULTATS

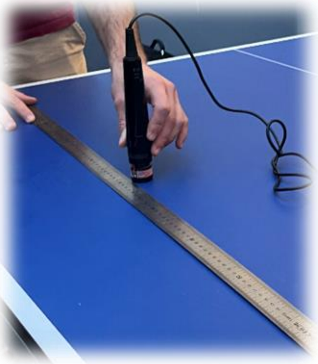
## ÉVALUATION DE L'ATTÉNUATION DU SIGNAL

- Mesure de l'amplitude de l'onde acoustique en fonction de la distance à la source




Modélisation mathématiques des résultats expérimentaux (avec barres d'incertitude)

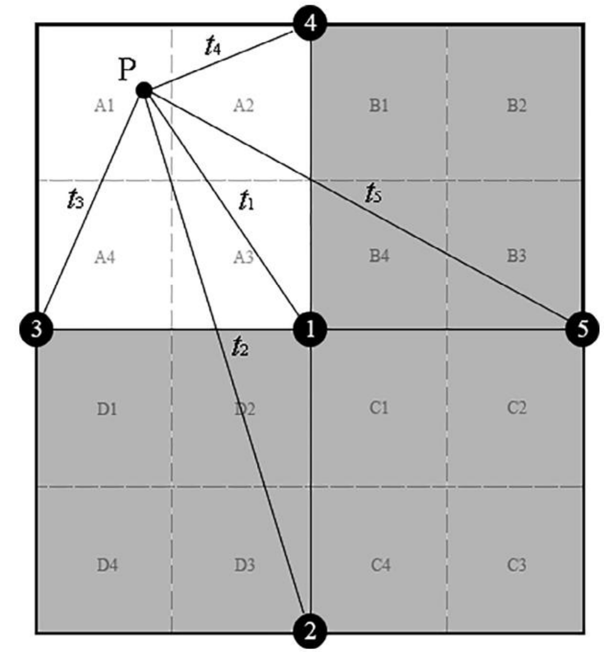
$$A(r) = \frac{0{,}1205}{r^{1{,}132}}$$



- Interprétation du modèle : répartition surfacique de la puissance véhiculée

# CONCLUSION DU TRAVAIL

- Une **démarche expérimentale** qui a invalidé certaines hypothèses formulées sur les phénomènes exploités
- Une mise en perspectives des résultats : **sources d'incertitudes** multiples et difficilement séparables
- L'**outil numérique** comme réponse aux obstacles rencontrés dans la détermination de la célérité des ondes sonores, pour garantir les performances du système
- Un procédé de localisation des impacts d'une **précision** supérieure à certains systèmes développés




Méthode dichotomique mise en œuvre par de une équipe de l'université de Pyongyang

# QUELQUES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


- ALAJLOUNI S, TARAZAGA P. : “A new fast and calibration-free method for footstep impact localization in an instrumented floor” : *Journal of Vibration and Control* (2019)
- YU, HYON-IL ET AL : “Low-cost system for real-time detection of the ball-table impact position on ping-pong table” : *Applied Acoustics, Volume 195* (2022)
- WU, PENG ET AL : “Time Difference of Arrival (TDoA) Localization Combining Weighted Least Squares and Firefly Algorithm” : *Sensors, 19, no. 2554* (2019)

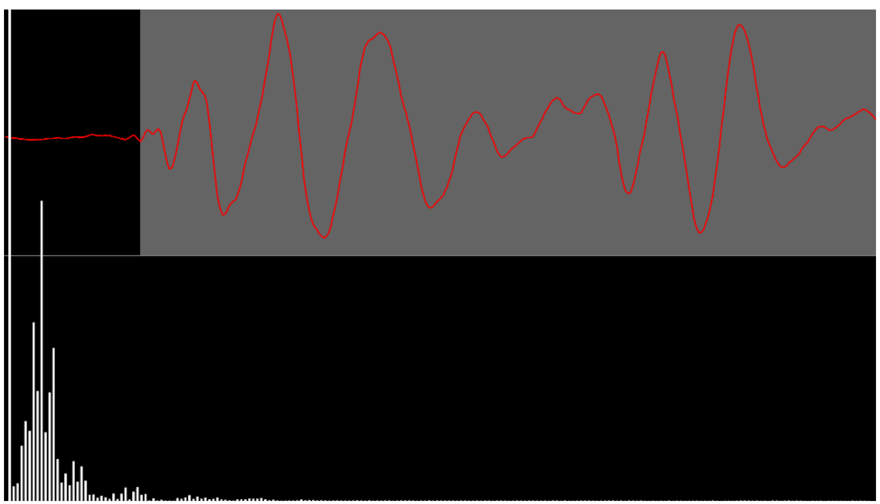
# - ANNEXES -

# ANNEXE 1 – ISOLATION PHONIQUE DES CAPTEURS

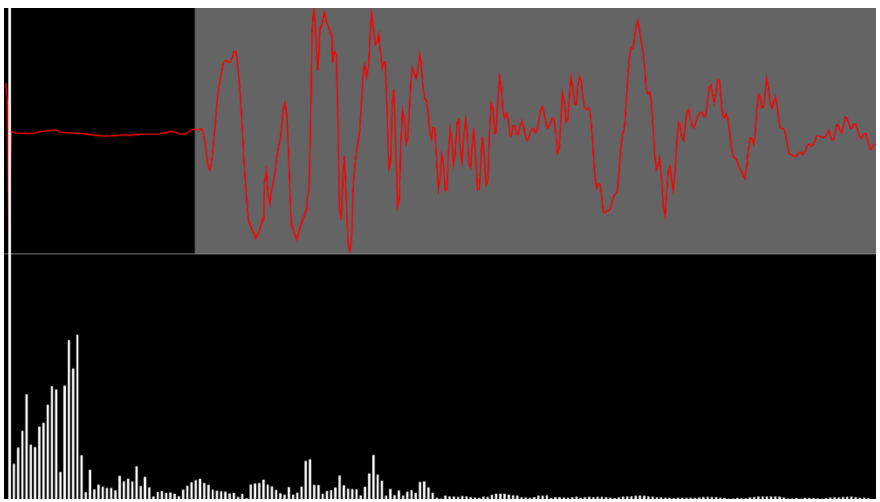
- Vérifications expérimentales de l'efficacité des capteurs (isolation phonique) :
  - Analyse de la **répartition fréquentielle** de la puissance enregistrée lors d'un impact standard
  - Calcul (*Scipy*) et comparaison du **rapport Signal/Bruit** lors d'un enregistrement sans impact

Enregistrement d'un impact standard :

AVEC le système d'isolation

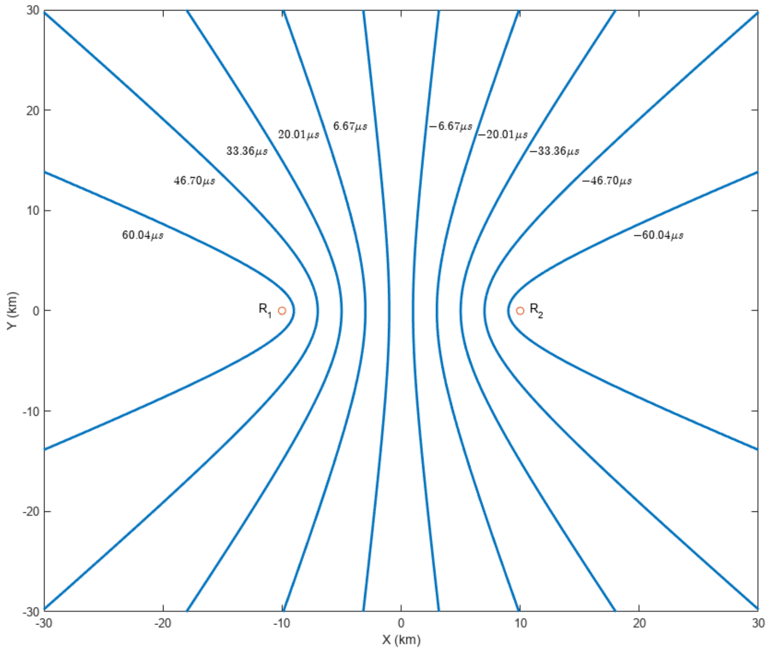


SANS le système d'isolation



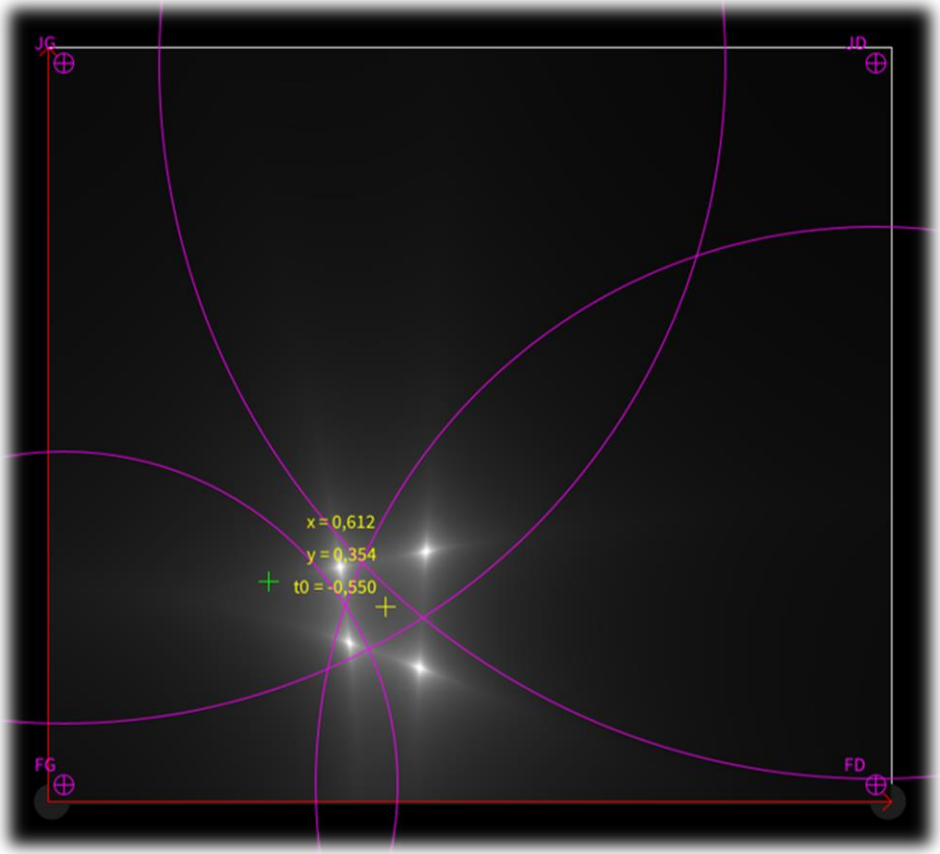
80 dB — Rapport Signal/Bruit — 72 dB

# ANNEXE 2 - TDOA




Hyperboles représentant l'ensemble des points d'impact dont les instants de réception au niveau des 2 capteurs de la paire R seraient séparés d'une certaine durée (en µs)

Interception des hyperboles issues pour localiser le point d'impact



# ANNEXE 3 – FILTRE NUMÉRIQUE

**Code** utilisé (C++, interface Arduino) :

```
void filterPBande(int micro[], float out[], int nbEchPerPeriod, float Q) {
  float w0Te = TWO_PI/float(nbEchPerPeriod);

  out[0] = 0;
  out[1] = 0;
  counter = (counter+2) % NBSAMPLE;

  for(int i = 2;i < NBSAMPLE;i++) {
    out[i] = 2*out[i-1] - out[i-2]*(1+w0Te*w0Te) + w0Te/Q * (micro[(counter-1+NBSAMPLE)%NBSAMPLE]
     - micro[(counter-2+NBSAMPLE)%NBSAMPLE] - out[i-1] + out[i-2]);
    if(counter >= NBSAMPLE) counter = 0;
    counter++;
    if(counter >= NBSAMPLE) counter = 0;
  }
}
```

- micro[] : liste contenant les échantillons originaux
- out[] : liste qui va contenir le signal filtré
- fréquece de filtrage : $f_0 = 1/T_0 = 1/(nbEchPerPeriod * T_e)$

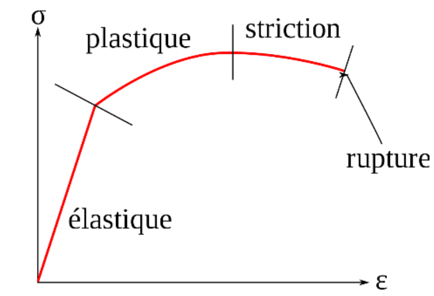
  (où $T_e$ = periode d'échantillonage = 15 µs)
- counter : variable utilisée pour obtenir le bon numéro d'échantillon (externe à la fonction)

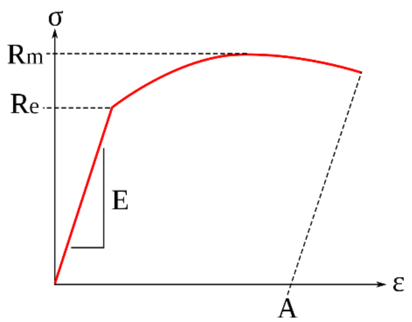
# ANNEXE 4 – MODULE D'YOUNG

**Loi d'élasticité** (**loi de Hooke**) : $\sigma = E.\varepsilon$

où :

$\sigma$ = contrainte de traction appliquée (en Pa)
$\varepsilon = (\ell - \ell 0)/\ell 0$ = déformation (un allongement relatif, adimensionné)
E = module de Young (en Pa)




Relation entre la **célérité du son et le module d'Young:** $c = \sqrt{E/\mu}$

où :

$\mu$ = masse volumique du matériau (en kg/m3)
c = célérité du son (en m/s)

Finalement :

$$\mathbf{c} = \sqrt{\sigma/\mu\varepsilon}$$


Linéariser la courbe $\sigma = f(\varepsilon)$ dans la **zone d'élasticité** du matériau pour déduire E de sa pente

# ANNEXE 5 – CÉLÉRITÉS DES ONDES SONORES DANS L'AIR

Dans le cadre de l'approximation acoustique :

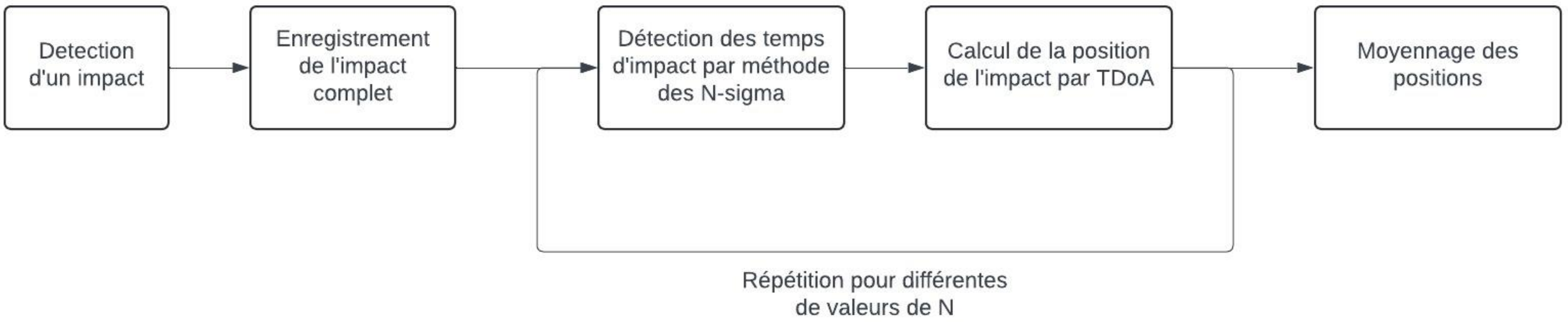
Propagation isentropique (adiabatique réversible) de l'air assimilé à un gaz parfait diatomique :

$$\boxed{\mathbf{C}_{\textbf{son air}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M_{air}}} = 343\ m \cdot s^{-1}}$$

- **C**$_{\textbf{son air}}$ = célérité de l'onde sonore dans l'air (en $m \cdot s^{-1}$)
- $\gamma = 1{,}4$ = coefficient adiabatique d'un gaz parfait diatomique
- $\mathrm{T} = 293\ K$ = température du gaz parfait
- $\mathrm{M}_{air} = 2{,}9 \times 10^{-2}\ kg \cdot mol^{-1}$ = masse molaire de l'air

# ANNEXE 6 – INCERTITUDE DÉTERMINATION ALGORITHMIQUE

Mise en œuvre algorithmique de la détermination du paramètre $\mathbf{C}_{\mathbf{son}}$ permettant la plus grande précision sur les localisations (base de données de 50 impacts) :




Valeur du paramètre retenue :
$\mathbf{C}_{\mathbf{son\ 3}} = (340 \pm 5)\ m \cdot s^{-1}$