



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

# Étude de la désexcitation des fragments de fission du $^{252}\text{Cf}$

28 Juin 2022

FRANCHETEAU Alexis<sup>1,2</sup>, GAUDEFROY Laurent<sup>1,2</sup>, ROIG Olivier<sup>1,2</sup>, Ébran Adeline<sup>1,2</sup>, MÉOT Vincent<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> CEA, DAM, DIF, F-91297, Arpajon, France, <sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680, Bruyères-le-Châtel, France

Le but est de mesurer le spectre prompt associé aux fragments de fission pour obtenir des informations sur la fonction de force  $\gamma$  ( $\gamma$ SF) et les densités de niveaux (NLDs) pour des noyaux riches en neutrons

## Introduction

- Motivations

- Dispositif Expérimental

## Double chambre d'ionisation à grilles de Frisch

- Description

- Calibrations des anodes

- Reconstruction des quantités

- pré-neutron

- Comparaison à la littérature

## Massif $4\pi$ -NaI

- Description

- Impact des neutrons

- Sélection d'isomère

## Résultats préliminaires

- Spectres prompts conditionnés par la masse

- Spectre prompt sélectionné par un isomère

- Fission froide

## Conclusion

Capture radiative:

- ▶ Évaluations des captures radiatives pour des noyaux riches en neutrons
- ▶ Modélisation du r-process [1]

Physique des réacteurs:

- ▶ échauffement  $\gamma$  prédit localement trop faible [2]  $\Rightarrow$  Besoin de données sur les  $\gamma$  prompts

$\Rightarrow$  Manque de connaissances expérimentales sur  $\gamma$ SF et NLD dans la région des fragments de fission: des données dans cette région peuvent améliorer les modélisations (utilisées par FIFRELIN [3], CGMF [4], FREYA [5])

[1] M. Arnould et al, Phys. Rep. **450**, 97 (2007)

[3] O. Litaize et al, Eur. Phys. J. A (2015) **51**, 177

[5] R. Vogt, J. Randrup, Phys. Proc. **47**, 3 (2013)

[2] D. Blanchet et al, Proc. of M&C 2005, Avignon, France

[4] B. Becker et al, Phys. Rev. C **87**, (2013)

Les noyaux riches en neutrons ont un temps de vie trop court pour une mesure directe:

- ▶ Mesure de la cascade  $\gamma$  qui suit la fission spontanée du  $^{252}\text{Cf}$
- ▶ Identification d'isomères pour restreindre le nombre de cascades
- ▶ Comparaison à des spectres simulés

### Avantages

- ▶ Pas de temps de faisceau
- ▶ Longue durée d'acquisition
- ▶ mesure d'observables sur les deux fragments

### Inconvénients

- ▶ Pas de séparations des cascades des deux fragments
- ▶ Identification partielle des fragments
- ▶ Pas de mesure d'énergie d'excitation

2 détecteurs aux missions différentes:

- ▶ Massif  $4\pi$ -NaI
  - Mesure des  $\gamma$  avec une grande efficacité
  - Sélection de transitions isomériques
- ▶ Double chambre d'ionisation à grilles de Frisch
  - Mesure de l'énergie cinétique des deux fragments
  - Trigger fission
  - mesure de la masse
  - Adaptée à une acquisition longue

Prise de données de Février à Juillet 2021.

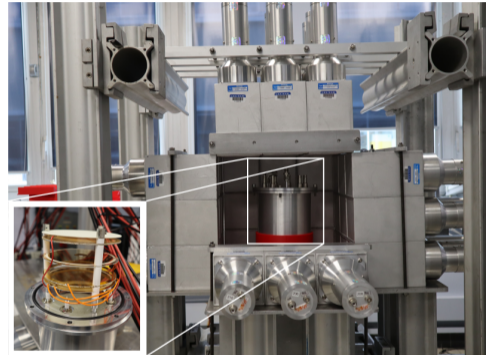


Photo du dispositif complet.  
La chambre ouverte est montrée en bas à gauche.

## Introduction

Motivations

Dispositif Expérimental

## Double chambre d'ionisation à grilles de Frisch

Description

Calibrations des anodes

Reconstruction des quantités  
pré-neutron

Comparaison à la littérature

## Massif $4\pi$ -NaI

Description

Impact des neutrons

Sélection d'isomère

## Résultats préliminaires

Spectres prompts conditionnés par la  
masse

Spectre prompt sélectionné par un  
isomère

Fission froide

## Conclusion

- ▶ Détecteur gazeux
- ▶ Deux fragments émis dos-à-dos depuis la source
- ▶ Chaque fragment est stoppé avant la grille
- ▶ Électrons se déplaçant entre la grille et l'anode induisent sur l'anode un signal proportionnel à l'énergie déposée ( $\sim KE$ )
- ▶ Les grilles écrantent les anodes de considérations angulaires

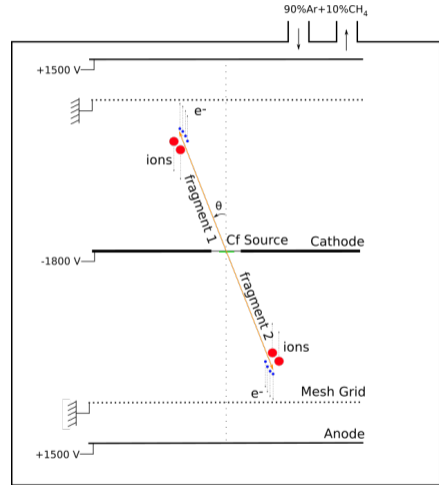


Schéma de principe.



Pour optimiser le dispositif, l'énergie perdue dans le support de la source doit être minimisée:

- ▶ Support de  $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ : 20 nm de carbone et 5-10 nm de Formwar
- ▶  $^{252}\text{Cf}$  déposé par transfert depuis une source mère pendant 2 ans dans un vide secondaire
- ▶ Activité résultante de  $4 \cdot 10^6$  fissions/j  $\Rightarrow$  total de  $9 \cdot 10^8$  fissions en 6 mois

L'énergie perdue par un fragment typique en traversant le support est de l'ordre de 300 keV ( $\sim 0.3\%$ )

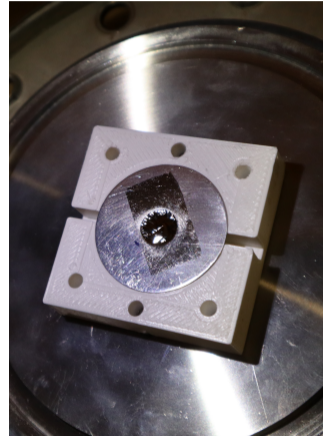
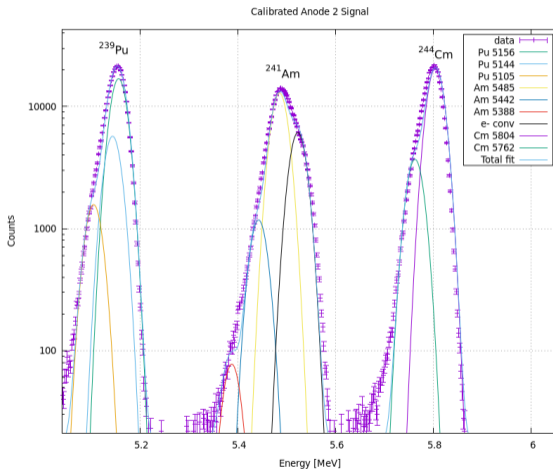


Photo de la source avant sa mise en place dans la chambre.

Test avec une source  $3\alpha$   
( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ):

- ▶ 35 keV (FWHM) de résolution, très proche de la résolution optimale pour ce type de détecteur.
- ▶ Pas comparable avec des Silicium, mais mieux adapté pour une longue acquisition (circulation du gaz)



Calibration avec la source  $3\alpha$

La calibration  $\alpha$  ne peut pas être utilisée:

- ▶ Différence entre les deux dispositifs (FF- $\alpha$ )
- ▶ Propagation d'erreurs non négligeable: 7% à 73 MeV, 9% à 100 MeV

La calibration est faite en utilisant l'énergie cinétique moyenne des fragments légers et lourds:

- ▶ Calibration sur les études précédentes
- ▶ Plusieurs corrections doivent être prises en compte:
  - Perte d'énergie dans le support ( $\Delta E$ )
  - Défaut d'impulsion (PHD) (ie: collisions non ionisantes)

$$\Rightarrow KE^{\text{post}} = E^{\text{dep}} + \frac{\Delta E}{\cos \theta} + \text{PHD}$$

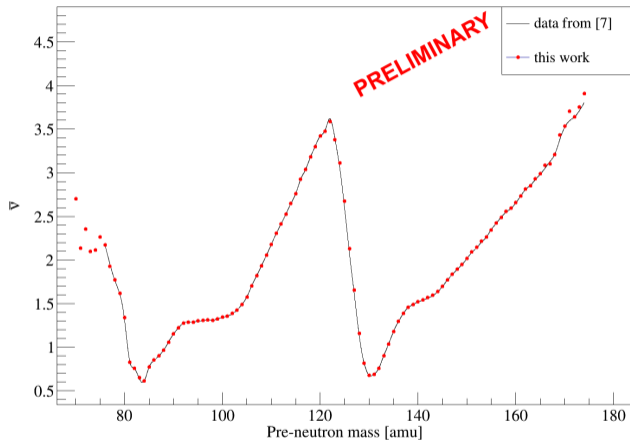
- ▶ Reconstruction des quantités avant émission de neutrons par une procédure itérative
- ▶ Estimation du nombre de neutrons émis par fragment en fonction de l'écart à la moyenne en TKE [6]:

$$\nu (m_i^{\text{pre}}, \text{TKE}) = \bar{\nu} (m_i^{\text{pre}}) + \frac{\bar{\nu} (m_i^{\text{pre}})}{\bar{\nu} (m_i^{\text{pre}}) + \bar{\nu} (252 - m_i^{\text{pre}})} \cdot \frac{\overline{\text{TKE}} (m_i^{\text{pre}}) - \text{TKE}}{B_n (m_i^{\text{pre}})}$$

- ▶  $B_n (m_i^{\text{pre}})$  représente l'énergie de séparation d'un neutron.
- ▶  $\bar{\nu} (m_i^{\text{pre}})$  pris de [7] et  $\overline{\text{TKE}} (m_i^{\text{pre}})$  déduit de cette procédure
- ▶ Permet de raffiner aussi les quantités post-neutron

[6] G. Barreau et al, Nuc. Phys. A, **432**, (1985), 411

[7] A. Göök, F.-J. Hambsch, M. Vidali, Phys. Rev. C, **90** (2014)



Comparaison du nombre moyen de neutrons émis par masse entre cette expérience et [7]

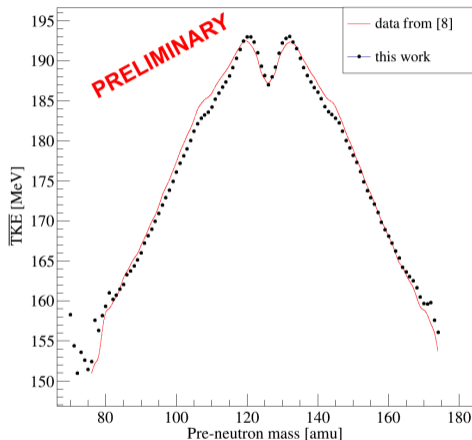
Accord satisfaisant entre la valeur moyenne du TKE mesurée et celle de la littérature:

- ▶ Littérature:  $\langle \text{TKE} \rangle = 184 \pm 1.5$  [9]
- ▶ Ce travail :  $\langle \text{TKE} \rangle = 183 \pm 0.7$

Légère différence sur la forme de la distribution comparé à [8].

[8] F.-J. Hamsch, S. Oberstedt, Nuc. Phys. A, **617** (1997)

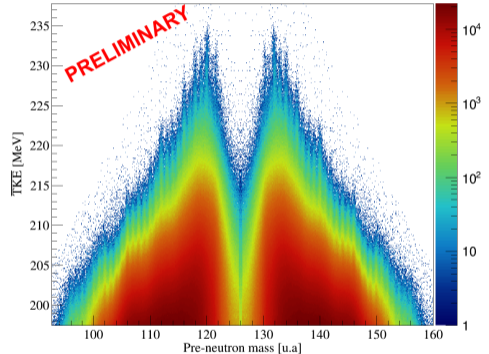
[9] C. Wagemans, *The Nuclear Fission Process*, (1991)



Distribution du TKE moyen en fonction de la masse

Fission froide (sans émission de neutrons) visible de chaque côté de la chambre, se traduit par des lignes:

- ▶ Conservation de l'impulsion:  $\vec{p}_1 = \vec{p}_2$
- ▶ donc  $A_1 \cdot E_1^K = A_2 \cdot E_2^K$
- ▶ ce qui donne:  $\frac{E_1^K}{E_2^K} = \frac{A_2}{A_1}$

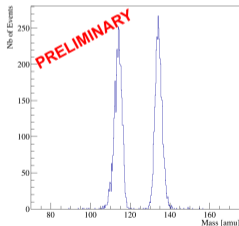


Histogramme 2D du TKE en fonction de la masse (pré-neutron)

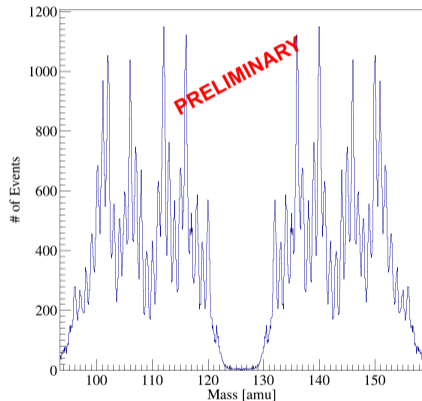
Fission froide:

- ▶ masses centrées sur les bonnes valeurs (forte contrainte)
- ▶ résolution de 0.7 u.a. (FWHM)

Résolution de 4.4 u.a. (FWHM) pour la fission "chaude"



Distribution en masse pré-neutron sélectionné par l'isomère du  $^{134}\text{Te}$



Distribution en masse pour la fission froide en utilisant une sélection en TKE préliminaire



## Introduction

Motivations

Dispositif Expérimental

## Double chambre d'ionisation à grilles de Frisch

Description

Calibrations des anodes

Reconstruction des quantités

pré-neutron

Comparaison à la littérature

## Massif $4\pi$ -NaI

Description

Impact des neutrons

Sélection d'isomère

## Résultats préliminaires

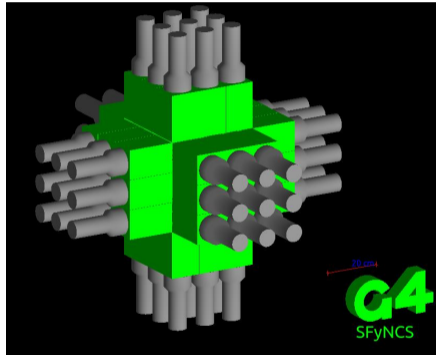
Spectres prompts conditionnés par la masse

Spectre prompt sélectionné par un isomère

Fission froide

## Conclusion

- ▶ 54 cristaux NaI (10cmx10cmx15cm)
- ▶ 94% d'efficacité géométrique
- ▶ Résolution de 6.5% à 667 keV



Simulation Geant4 des 54 NaI.

Sélection d'isomères pour avoir une identification totale d'au moins un des fragments.

Exemple du  $^{134}\text{Te}$  dans la suite:

- ▶ Isomère bien connu de 164 ns
- ▶ Isomère très peuplé 1% des fissions
- ▶ 3  $\gamma$ : 1279, 297, 115 keV

[9] K.S. Saha et al., Phys. Rev. C **65**, 017302 (2002)

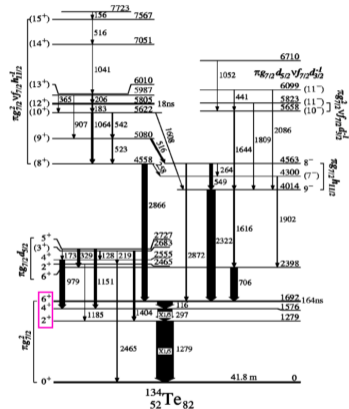
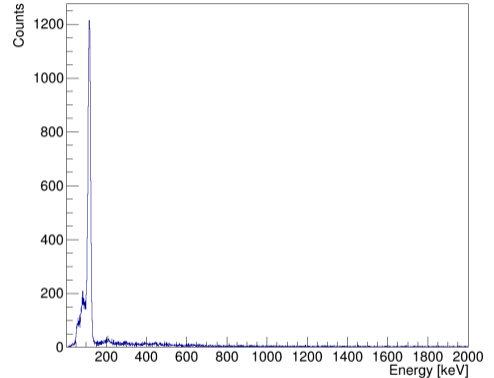


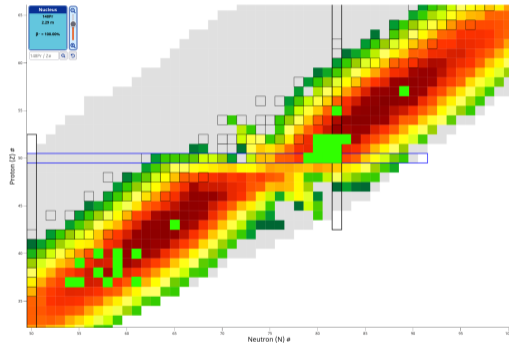
Schéma de niveaux connu du  $^{134}\text{Te}$  [9]

- ▶ Conditions sur la masse,  $M \in [132;136]$
- ▶ Condition sur le retard,  $> 30$  ns
- ▶ Sélection de plusieurs transitions de la cascade retardée
- ▶ Spectre retardé en coïncidence (dans 10 ns autour des  $\gamma$  sélectionnés)
- ▶  $T_{1/2} = 164 \pm 2$  ns



Spectre retardé en coïncidence avec les transitions de 1279 et 297 keV, avec une sélection en masse

- ▶ 25 isomères identifiés avec un statistique suffisante
- ▶ Différentes régions de déformations peuplées
- ▶ Pas d'observation de deux isomères dans le même évènement
- ▶ Isomère du  $^{134}\text{Te}$  visible en fission froide



Carte des noyaux (NuDat) avec les isomères observés représentés par des carrés verts

## Introduction

Motivations

Dispositif Expérimental

## Double chambre d'ionisation à grilles de Frisch

Description

Calibrations des anodes

Reconstruction des quantités  
pré-neutron

Comparaison à la littérature

## Massif $4\pi$ -NaI

Description

Impact des neutrons

Sélection d'isomère

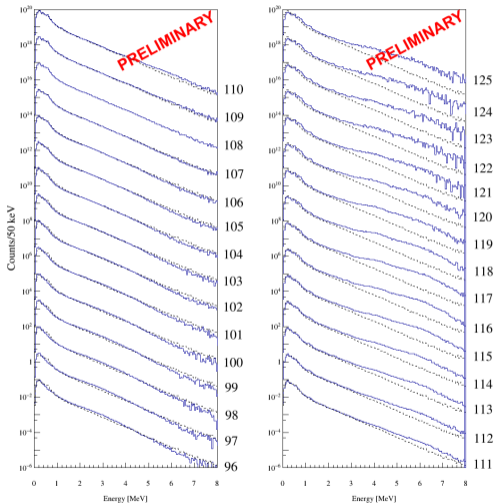
## Résultats préliminaires

Spectres prompts conditionnés par la  
masse

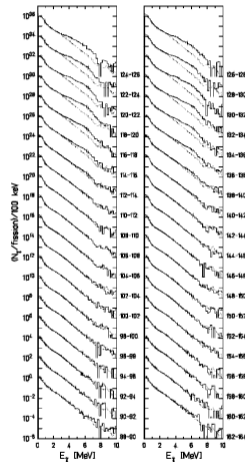
Spectre prompt sélectionné par un  
isomère

Fission froide

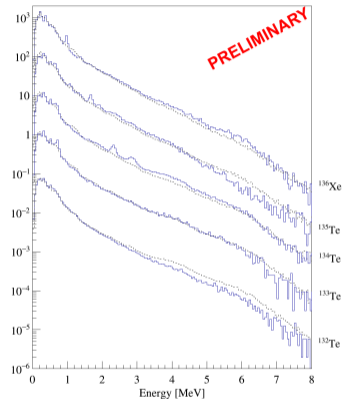
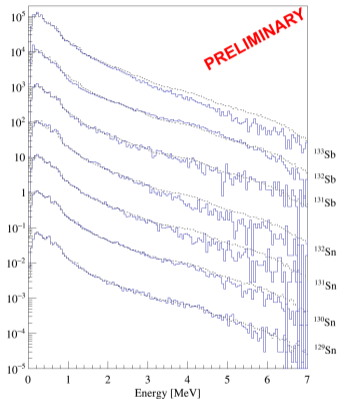
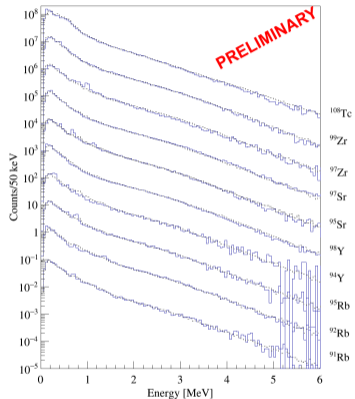
## Conclusion



Évolution du spetre prompt en fonction de la masse

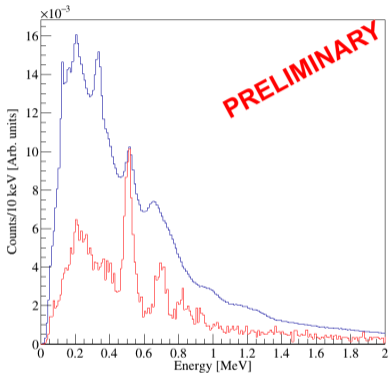


Comparaison avec [10] (A. Hotzel et al., Z. Phys. A **356**, 299-308 (1996))

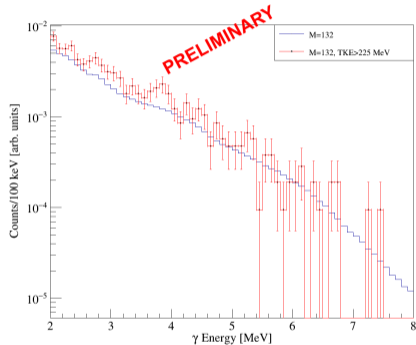


Évolution du spectre prompt en fonction de l'isomère sélectionné, avec en pointillé le spectre prompt sélectionné par la masse correspondante

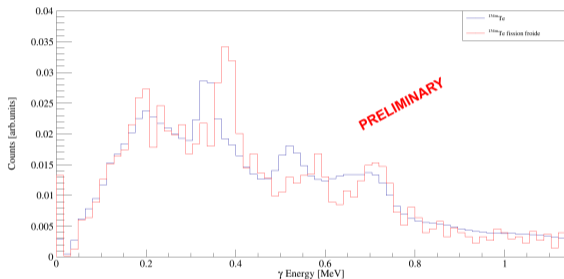




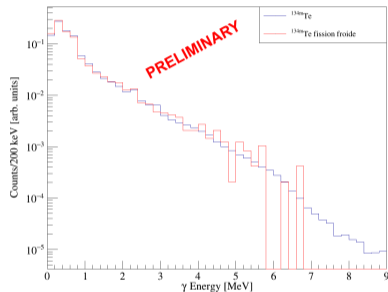
Partie basse énergie du spectre prompt sélectionné par la masse 132: en rouge sélectionné par la fission froide, normalisé de sorte que le pic le plus intense ait la même intensité que sur le bleu (sans fission froide)



Haute énergie du spectre prompt pour la masse 132, les deux spectres sont normalisés à 1



Partie basse énergie du spectre prompt alimentant l'isomère du  $^{134}\text{Te}$  (bleu) et l'alimentation en fission froide (rouge)



Partie haute énergie du spectre prompt alimentant l'isomère du  $^{134}\text{Te}$  (bleu) et l'alimentation en fission froide (rouge)

- ▶ Expérience sélective
  - autant sur la cinétique des fragments
  - que sur leur identification
- ▶ 25 isomères identifiés dans différentes régions

## Perspectives:

- ▶ Simulation Geant4
- ▶ Comparaison des données à des cascades simulées (FIFRELIN, CGMF, QRPA  $\gamma$ SF, NLD ...)



**Thank you for your attention**

FRANCHETEAU Alexis<sup>1,2</sup>, GAUDEFROY Laurent<sup>1,2</sup>, ROIG Olivier<sup>1,2</sup>, Ébran Adeline<sup>1,2</sup>,  
MÉOT Vincent<sup>1,2</sup>