



# *Évolution temporelle des fonctions de distribution des ions sous l'action des instabilités du plasma : application au propulseur de Hall*

Quentin Delavière--Delion<sup>1, 2</sup>, Freddy Gaboriau<sup>1</sup>, Gwenaël Fubiani<sup>1</sup>, Laurent Garrigues<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laplace, Université Paul Sabatier - CNRS, Toulouse, France

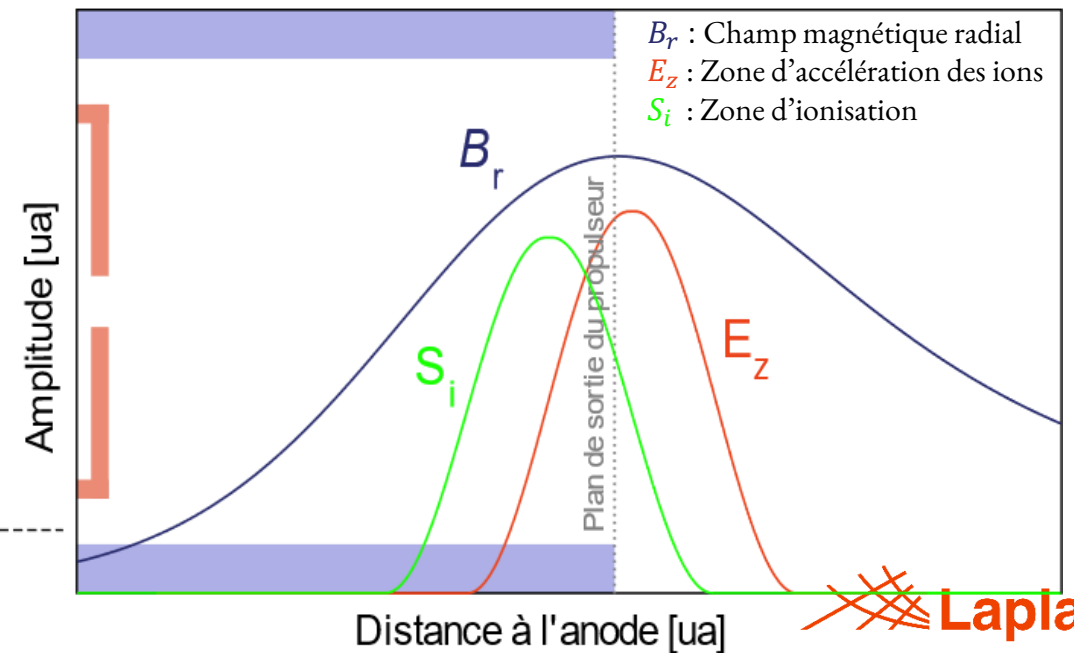
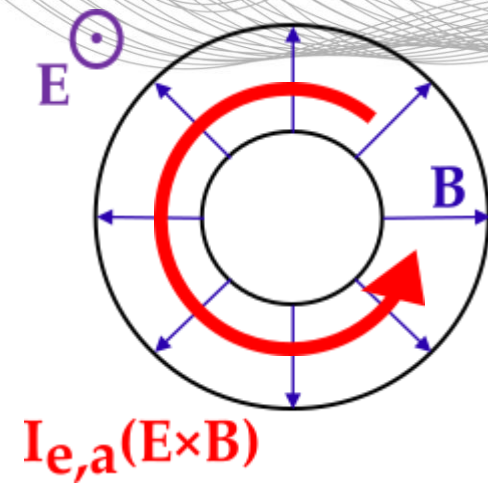
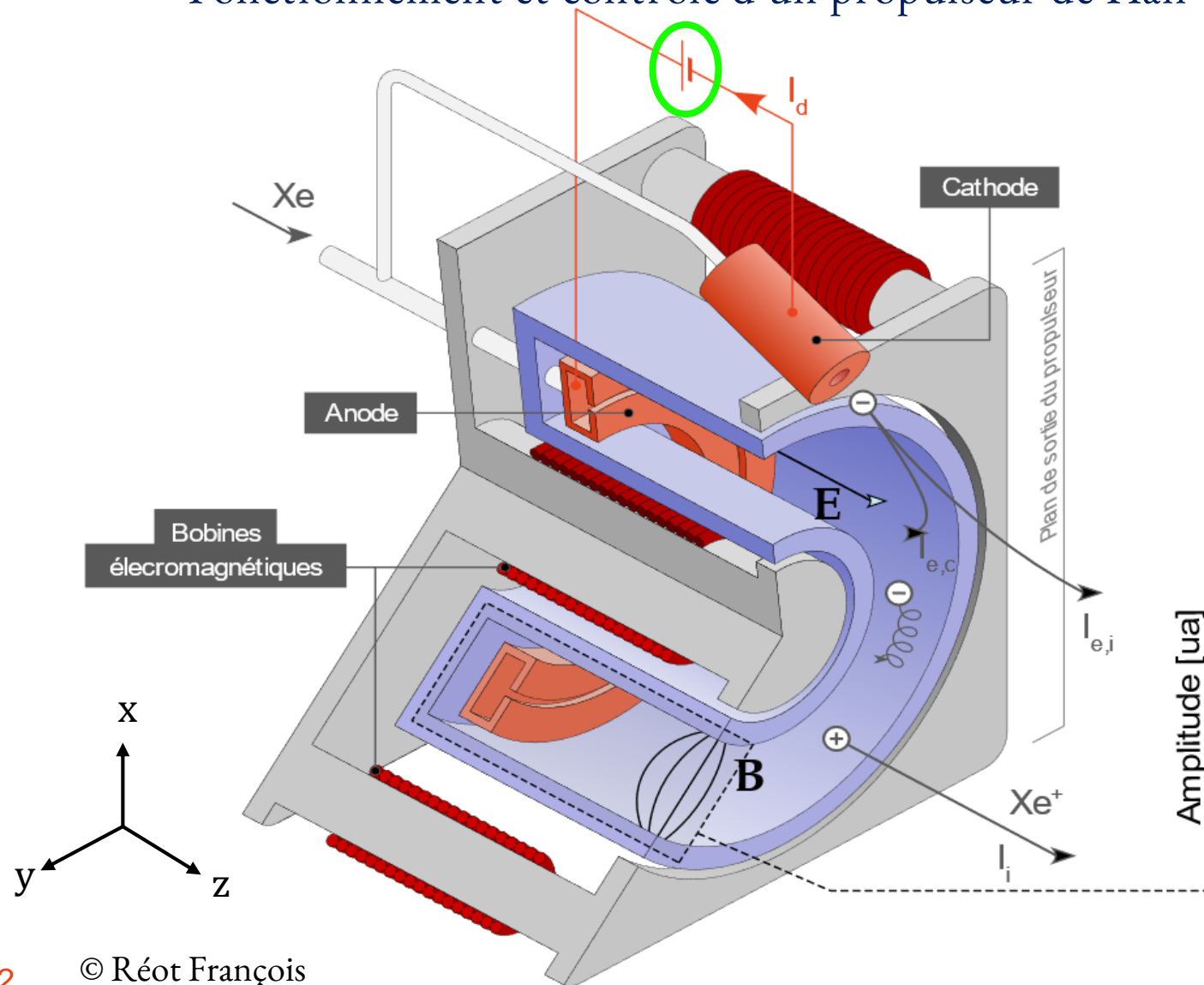
<sup>2</sup>ONERA-DPHY, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France

*Sujets d'actualité*



# Contexte de l'étude

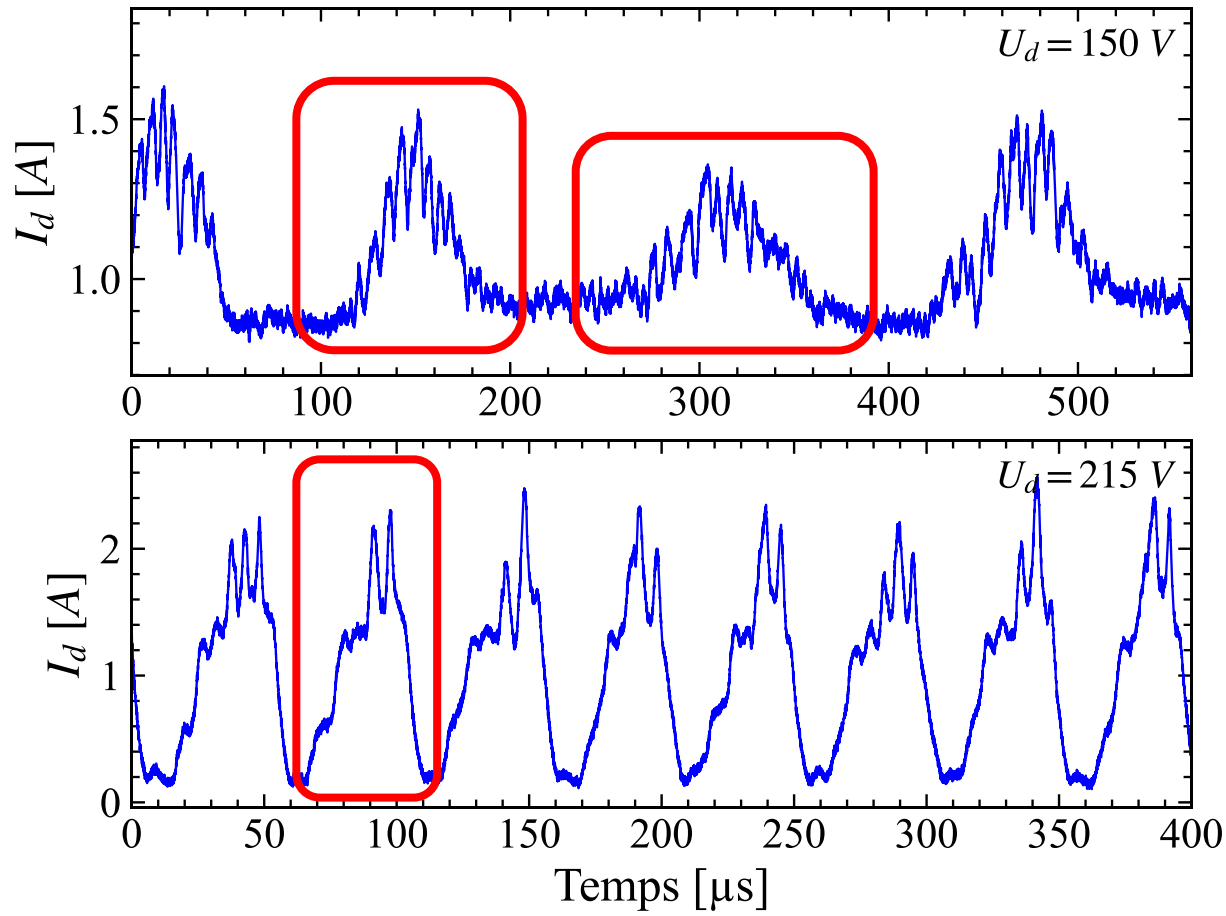
## Fonctionnement et contrôle d'un propulseur de Hall





# Contexte de l'étude

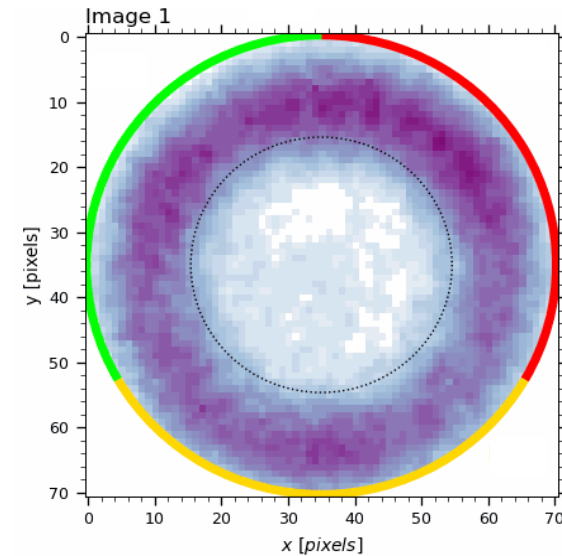
## Signature des instabilités axiales sur le courant de décharge



### *Le breathing mode (1-30 kHz) :*

→ Il s'agit d'une **instabilité globale** du plasma, se manifestant par la **variation de l'ionisation** dans le canal au cours du temps\*.

→ Elle peut être détectée de différentes manières, telles que par des **variations périodiques** de la **luminosité du plasma** et du **courant de décharge\*\***.



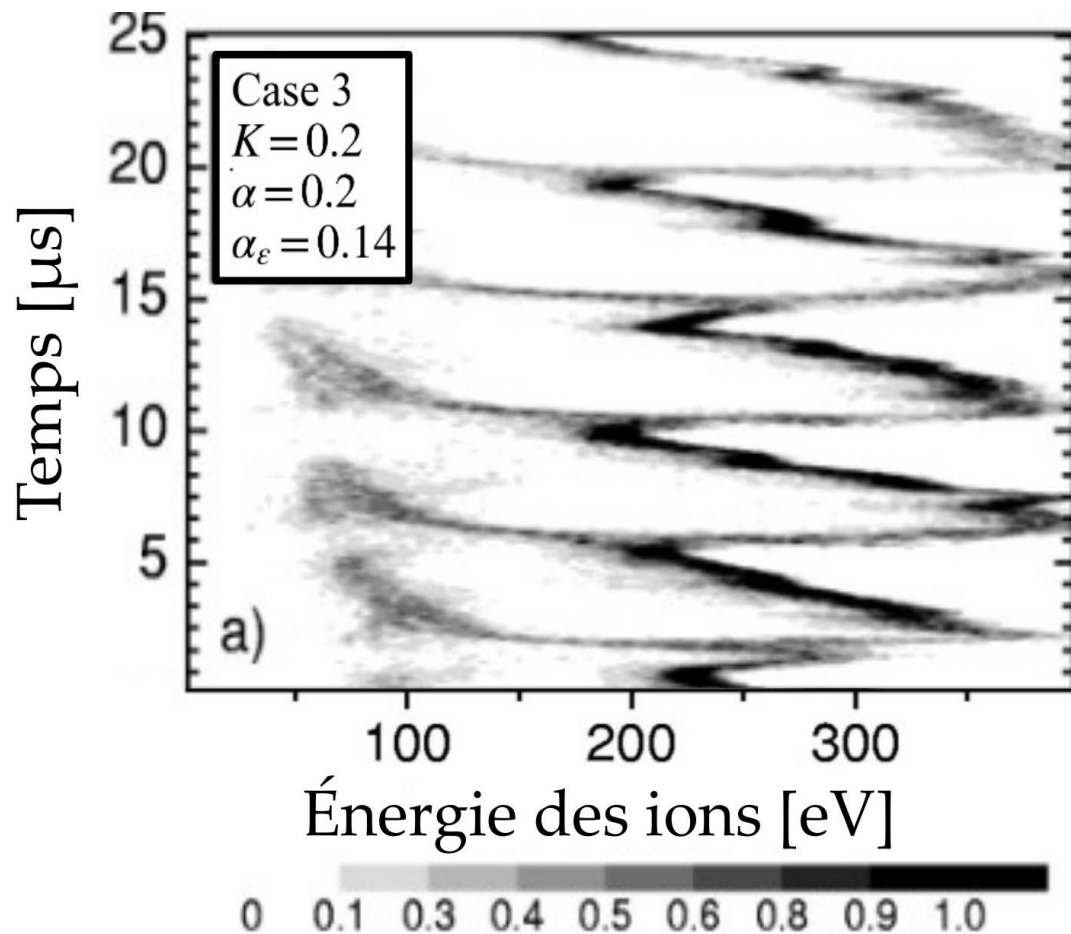
\* Low frequency oscillations in a stationary plasma thruster – Boeuf et Garrigues – 1998

\*\* Spontaneous oscillations in a Hall thruster – Darnon et al - 1999



# Contexte de l'étude

## Signature des instabilités axiales sur le courant de décharge



### *Oscillations de temps de transit ionique (ITTO)* (70-500 kHz) :

→ Se manifestent à travers des **oscillations** du courant de décharge dont la **période est égale au temps que mettent les ions pour traverser la zone d'accélération**.

→ Les simulations numériques nous indiquent qu'il s'agit d'une **instabilité globale** du plasma qui se manifeste par une **oscillation d'une fraction du champ électrique accélérateur** impactant en retour l'évolution de la vitesse des ions au cours du temps\*\*.

→ *Est-ce que ce comportement des ions est représentatif de la dynamique ionique observée expérimentalement dans un véritable propulseur de Hall ?*

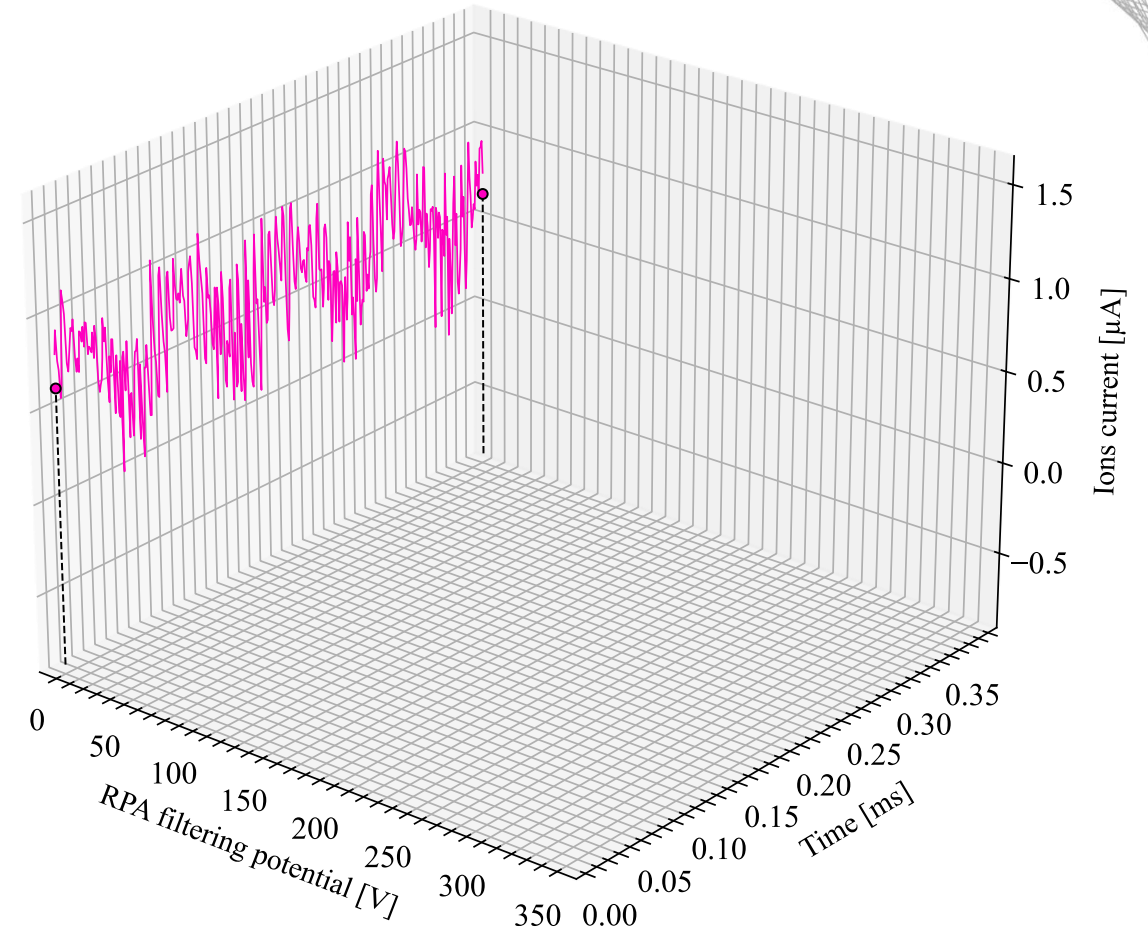
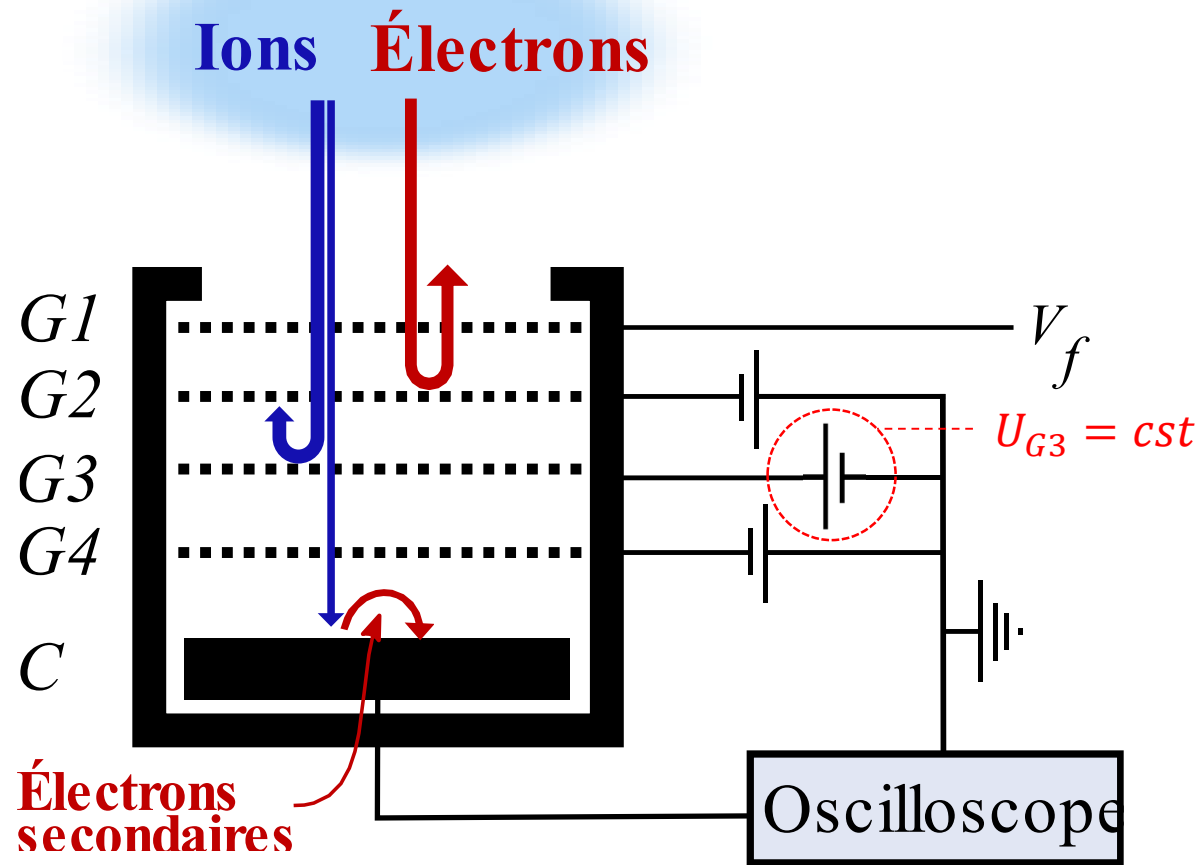
\* Critical assessment of a two-dimensional hybrid Hall thruster model: Comparisons with experiments – Bareilles, Hagelaar, Garrigues et al - 2004

\*\* Two-dimensional effects on electrostatic instabilities in Hall thrusters. II. Comparison of particle-in-cell simulation results with linear theory dispersion relations – Petronio, Charoy, Alvarez Laguna, Bourdon & Chabert - 2023



# Principe de la mesure résolue temporellement au RPA

Mesures temporelles au RPA

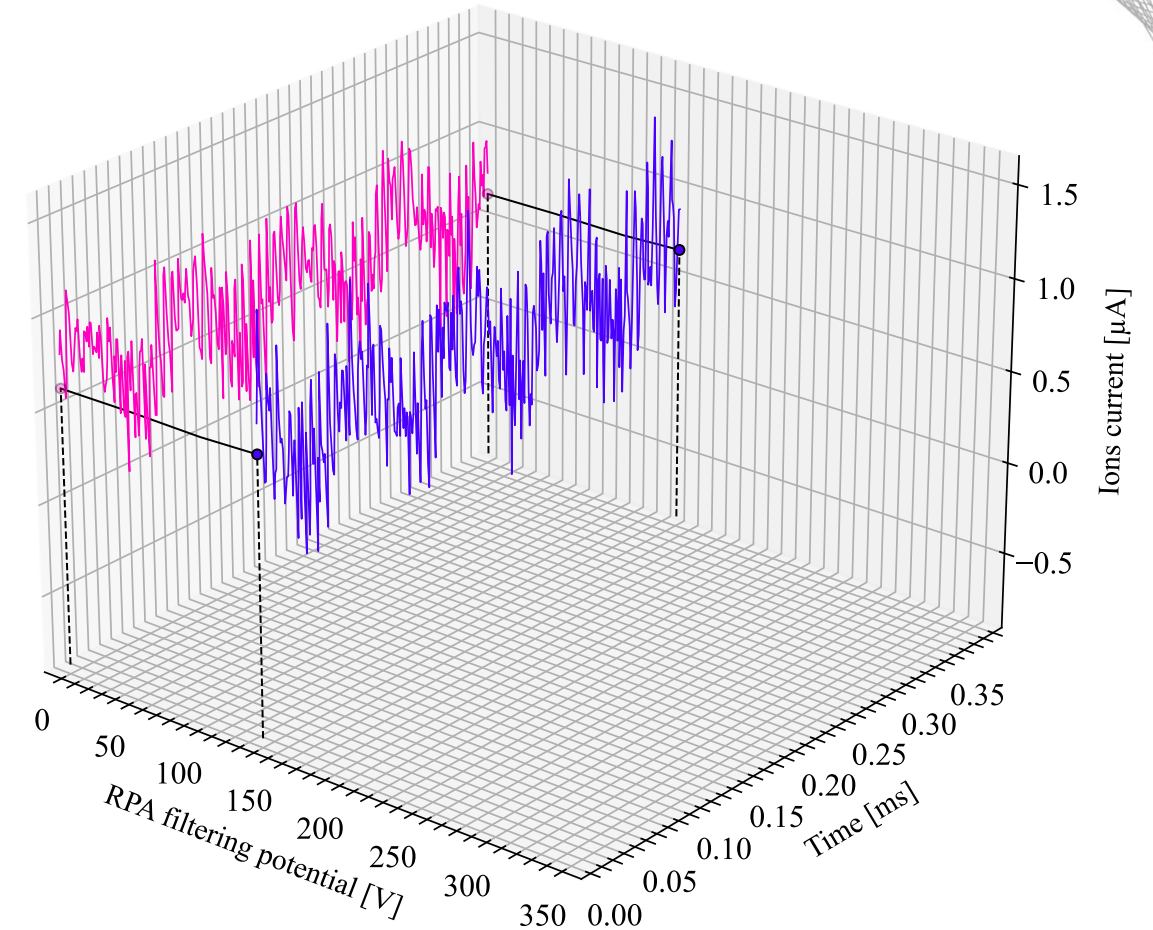




# Principe de la mesure résolue temporellement au RPA

## Mesures temporelles au RPA

→ La tension de filtrage du RPA est augmentée graduellement. Pour chaque tension de filtrage, une acquisition temporelle est effectuée.



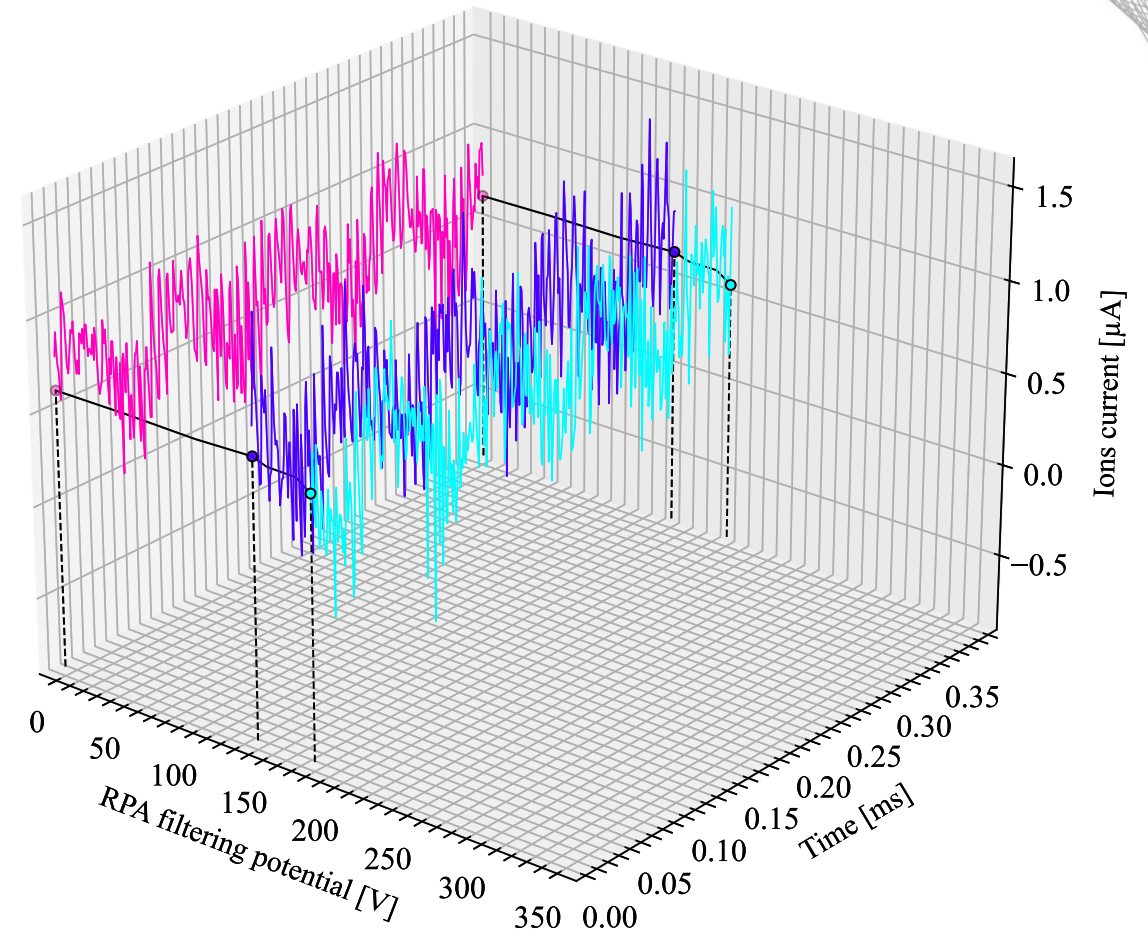


# Principe de la mesure résolue temporellement au RPA

## Mesures temporelles au RPA

→ La **tension de filtrage** du RPA est **augmentée** graduellement. **Pour chaque tension de filtrage**, une **acquisition temporelle** est effectuée.

→ À partir d'une certaine tension de filtrage, le **courant d'ions** collecté commence à **diminuer**.

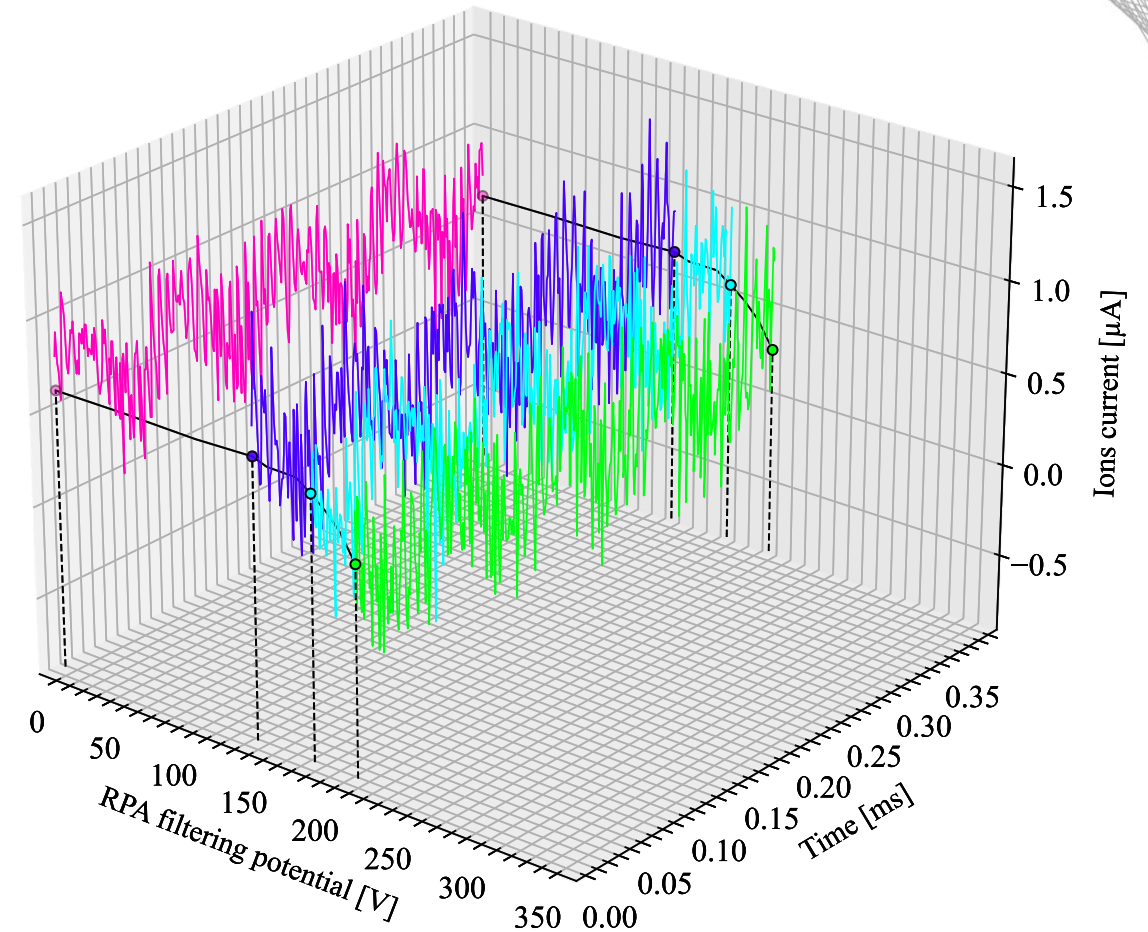




# Principe de la mesure résolue temporellement au RPA

## Mesures temporelles au RPA

- La **tension de filtrage** du RPA est **augmentée** graduellement. **Pour chaque tension de filtrage**, une **acquisition temporelle** est effectuée.
- À partir d'une certaine tension de filtrage, le **courant d'ions** collecté commence à **diminuer**.
- **De moins en moins** d'ions ont une **énergie suffisante** pour **traverser la barrière de potentiel**.

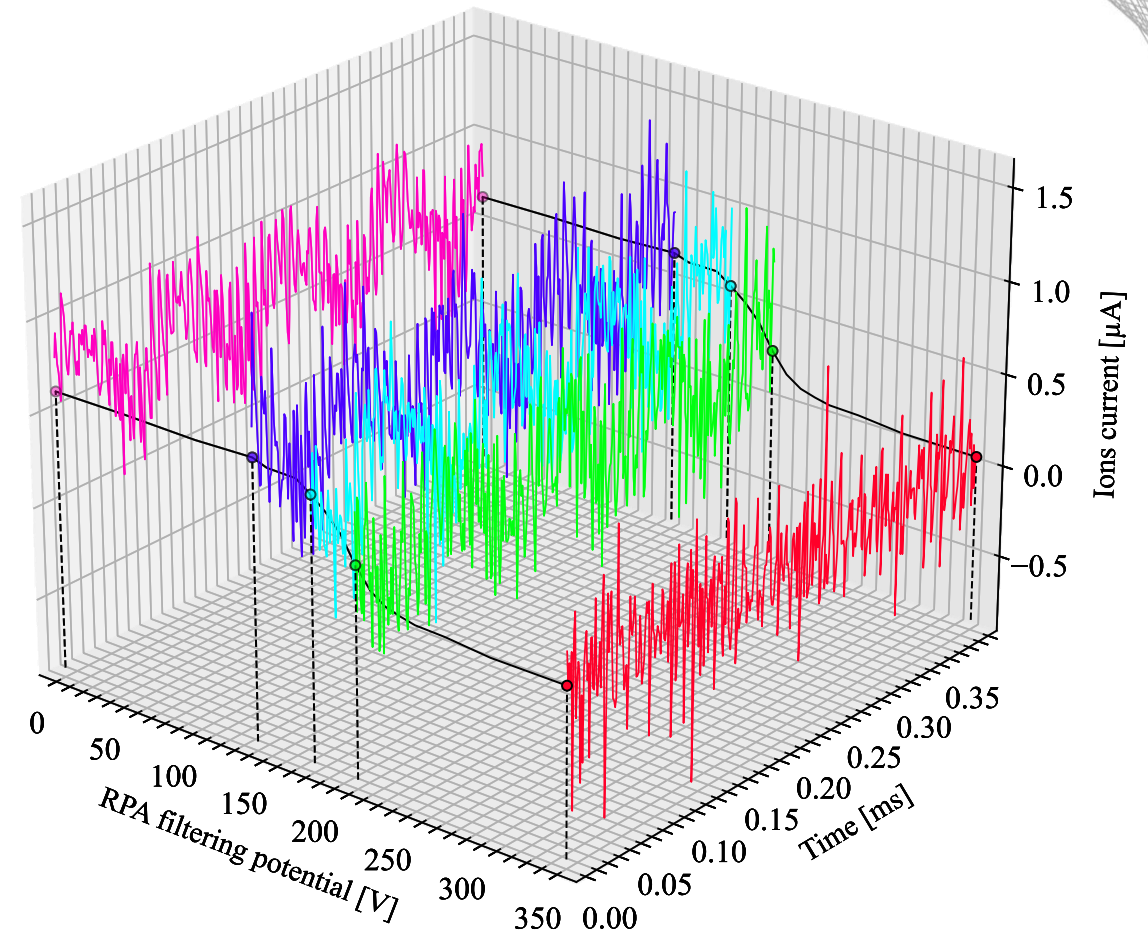




# Principe de la mesure résolue temporellement au RPA

## Mesures temporelles au RPA

- La **tension de filtrage** du RPA est **augmentée** graduellement. **Pour chaque tension de filtrage**, une **acquisition temporelle** est effectuée.
- À partir d'une certaine tension de filtrage, le **courant d'ions** collecté commence à **diminuer**.
- **De moins en moins** d'ions ont une **énergie suffisante** pour **traverser la barrière de potentiel**.
- Lorsque plus aucun ion ne dispose d'une énergie suffisante, le **courant d'ions collecté tend vers zéro**.

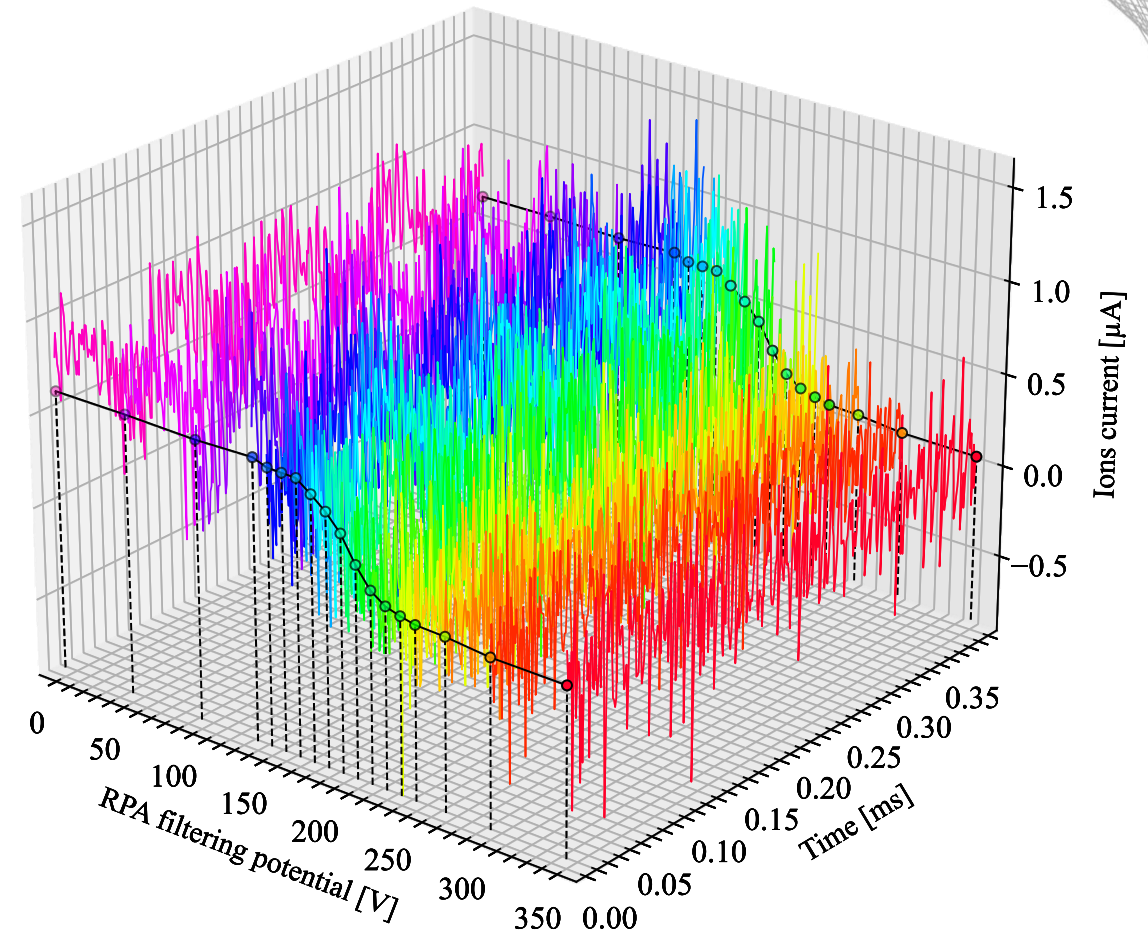




# Principe de la mesure résolue temporellement au RPA

## Mesures temporelles au RPA

- La **tension de filtrage** du RPA est **augmentée** graduellement. **Pour chaque tension de filtrage**, une **acquisition temporelle** est effectuée.
- À partir d'une certaine tension de filtrage, le **courant d'ions** collecté commence à **diminuer**.
- **De moins en moins** d'ions ont une **énergie suffisante** pour **traverser la barrière de potentiel**.
- Lorsque plus aucun ion ne dispose d'une énergie suffisante, le **courant d'ions collecté tend vers zéro**.
- La **résolution énergétique** est augmentée.

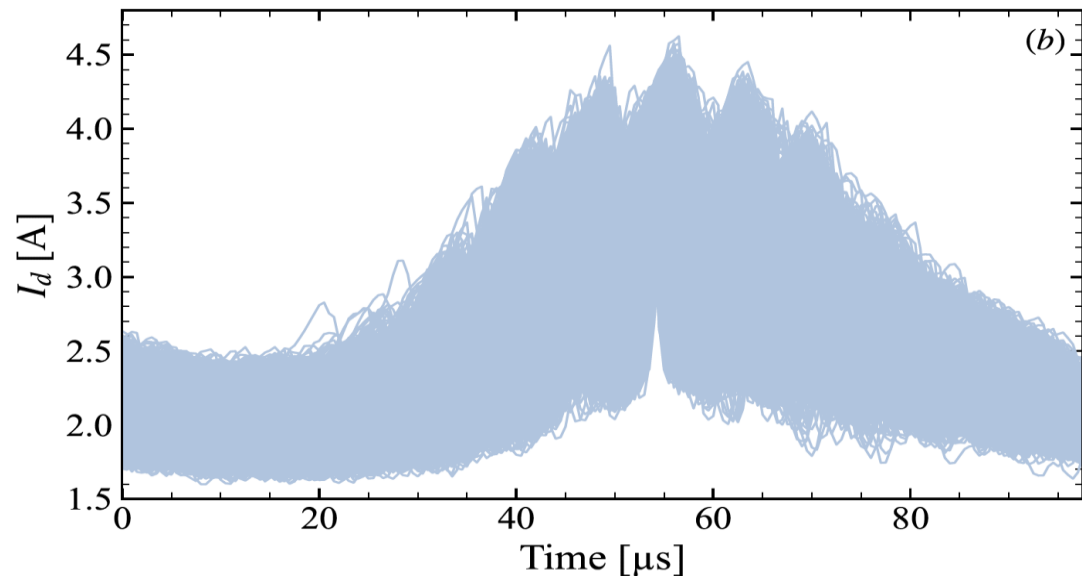
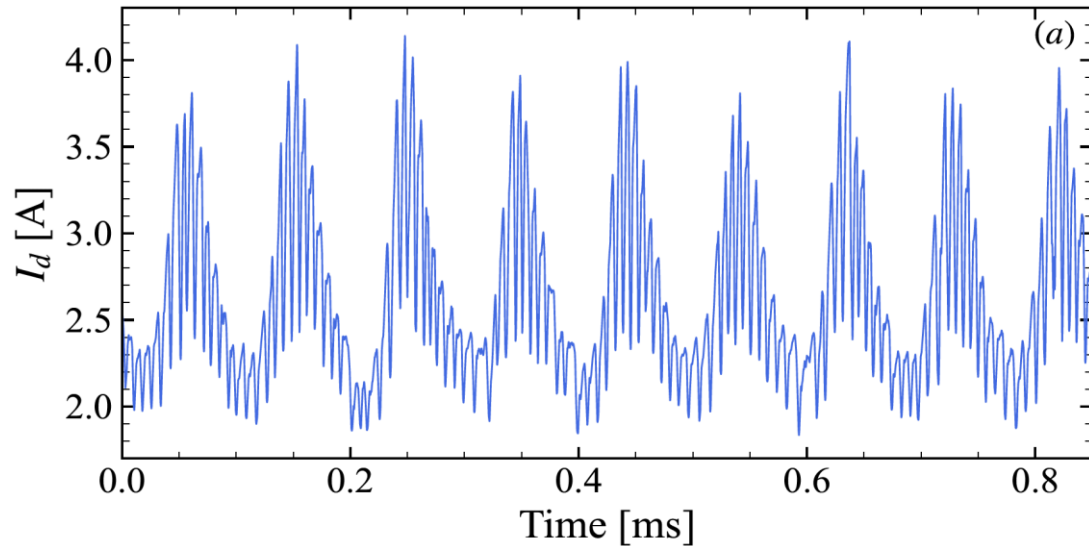






# Reconstruction des FDTI

## Problématique de l'irrégularité de la décharge



### Difficulté à résoudre les FDTI à l'échelle des ITTO :

→ Oscillations irrégulières à la fois en amplitude, en fréquence et en forme, avec un nombre variable d'ITTO pour une unique oscillation de BM.

### Que proposons-nous ?

→ Mise en œuvre d'un algorithme de mesure de la similarité des oscillations pour **identifier les événements les plus similaires**.

### Hypothèses :

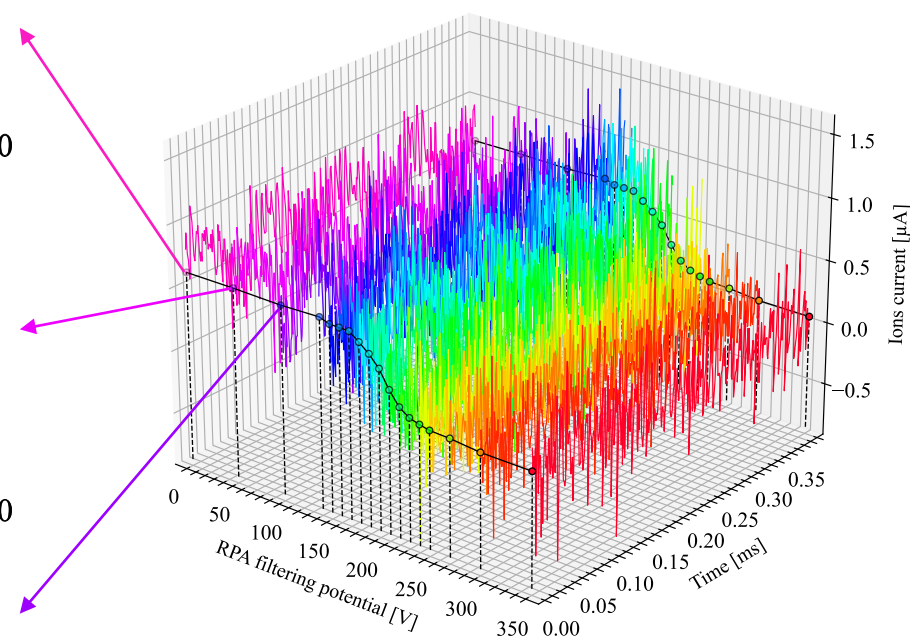
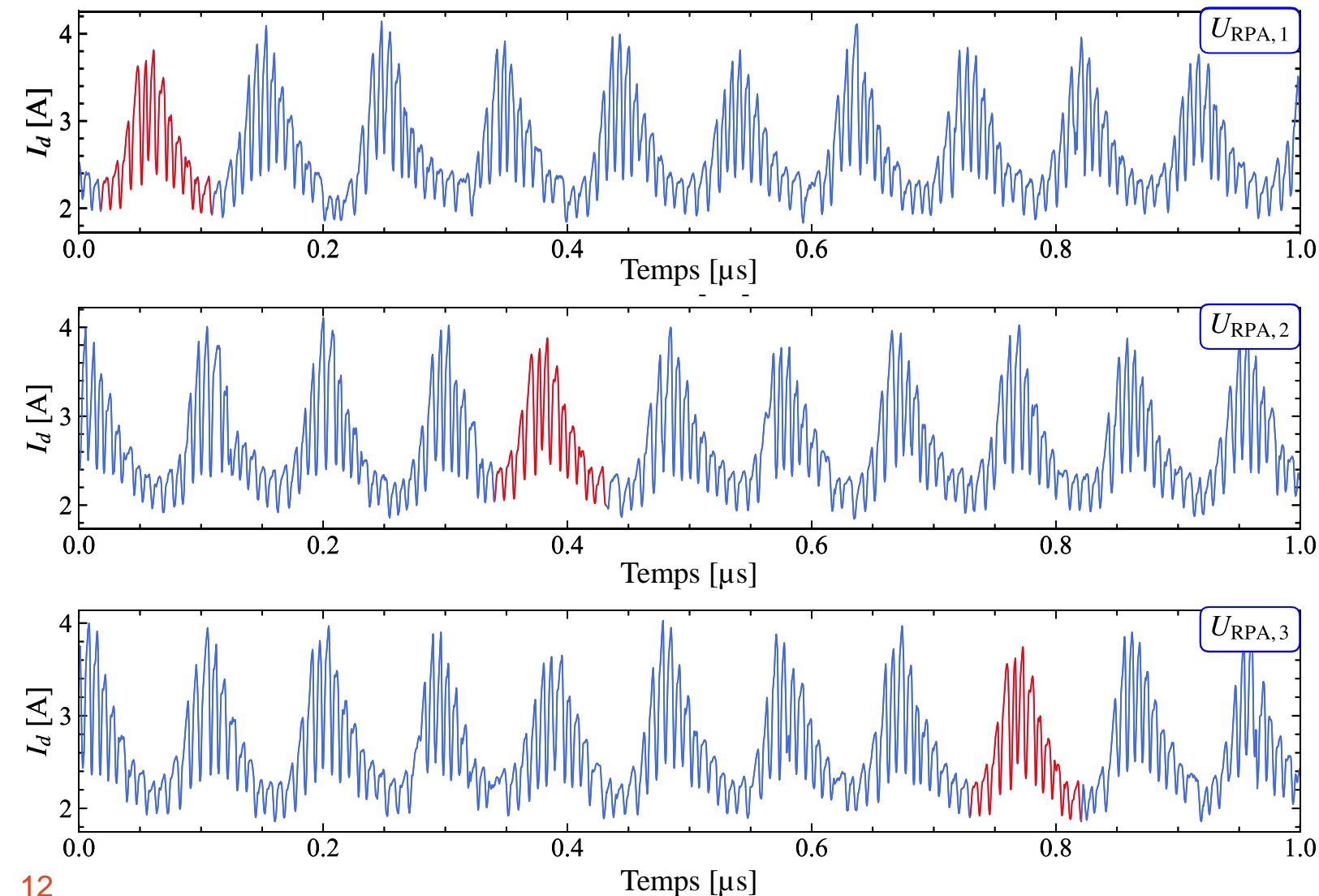
- Des oscillations suffisamment similaires vont se produire sur une période de temps suffisamment courte ;
- Des conséquences similaires ont des causes similaires.





# Reconstruction des FDTI par recherche d'évènements similaires

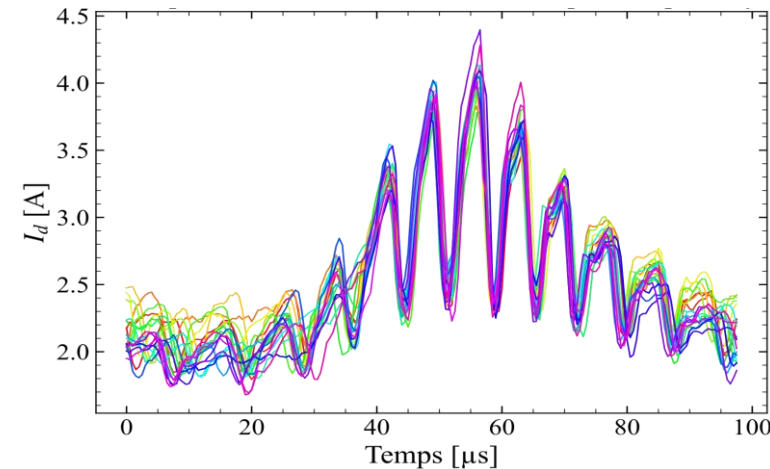
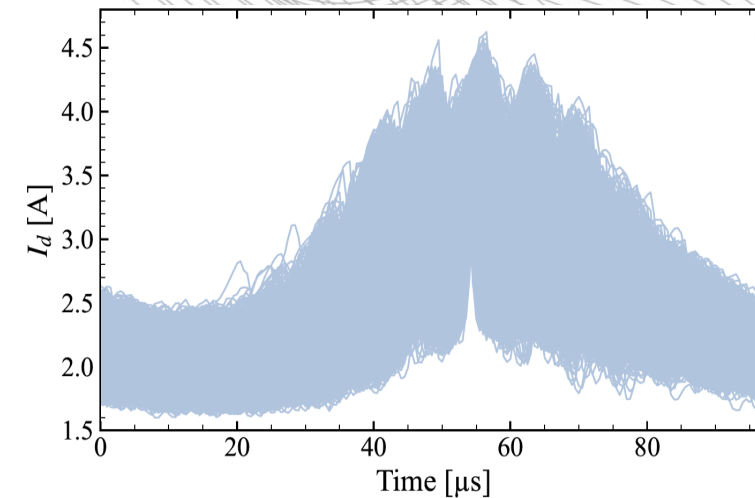
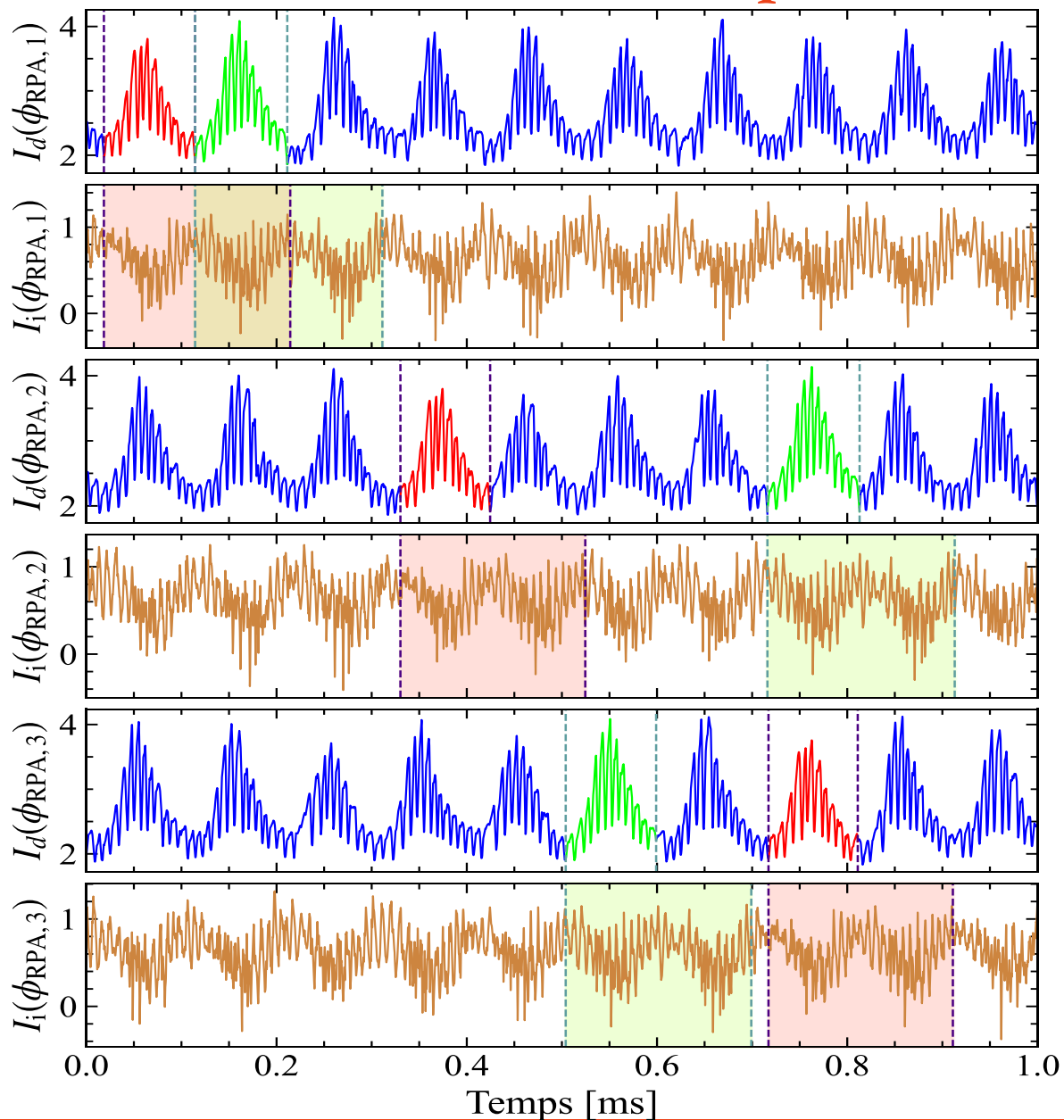
Identification des motifs les plus similaires sur les séries temporelles d'un signal de référence d'un ensemble de données







# Reconstruction des FDTI par recherche d'évènements similaires



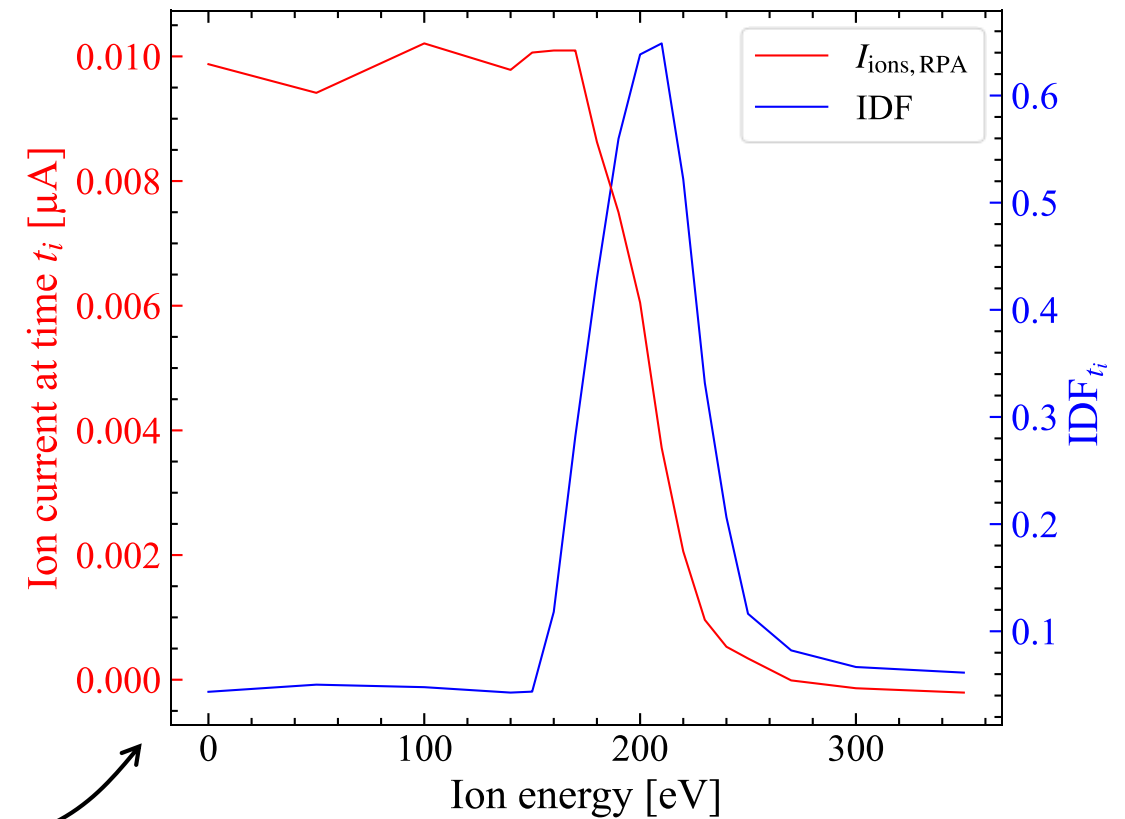
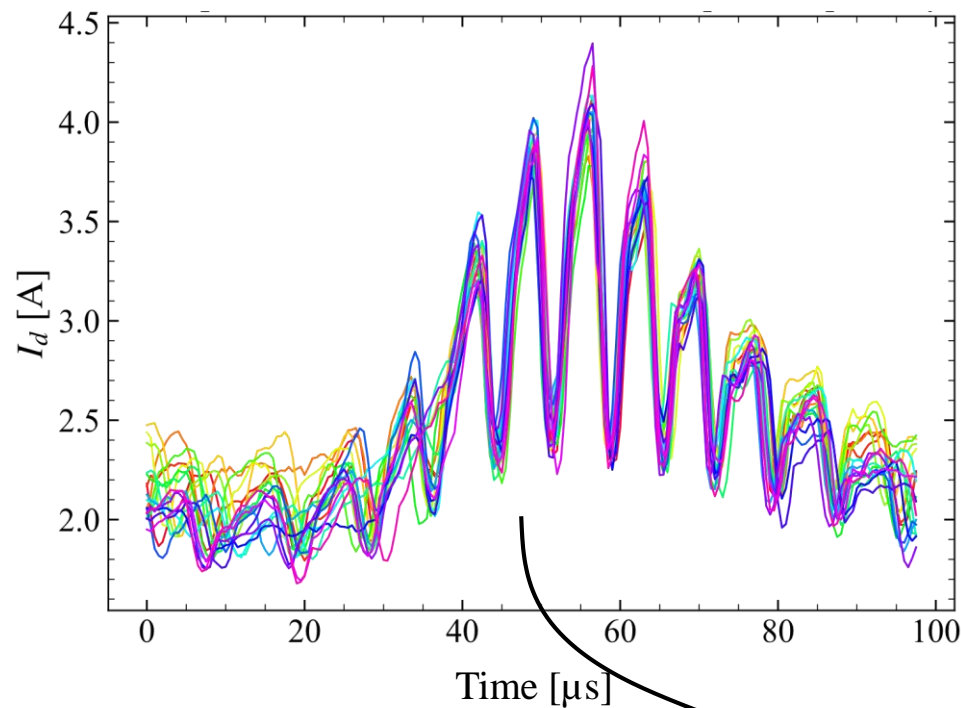
→ Récupération des motifs de la famille de motif minimisant les écarts.

→ Ici UNE famille parmi 3662.  Laplace



# Reconstruction des FDTI par recherche d'évènements similaires

Récupération des courants d'ions correspondant à la famille de motif maximisant le taux de similarité entre les différents motifs d'oscillation



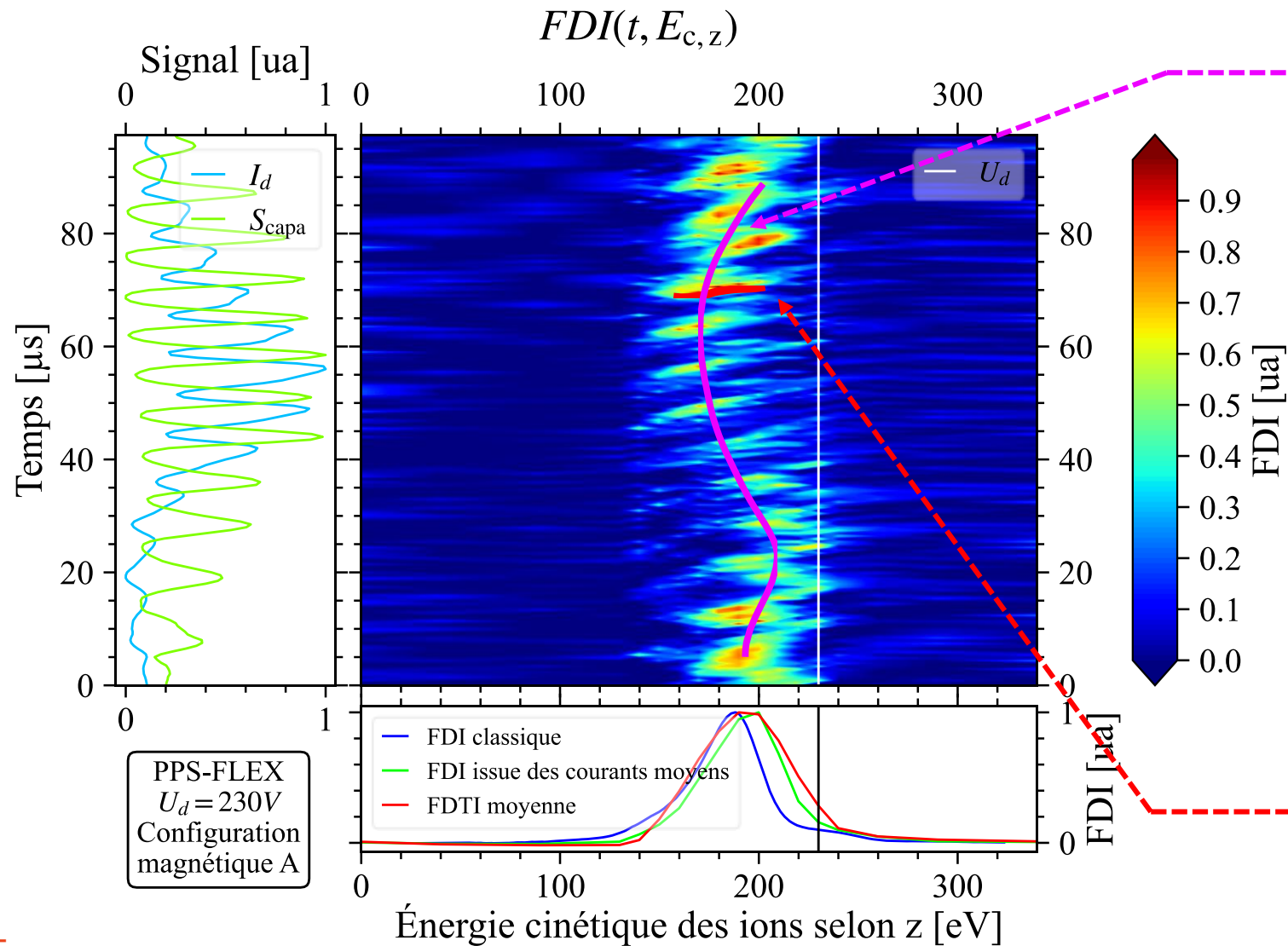
→ Les courants d'ions sont **extraits pour chaque temps**, puis la FDI associée est reconstruite.



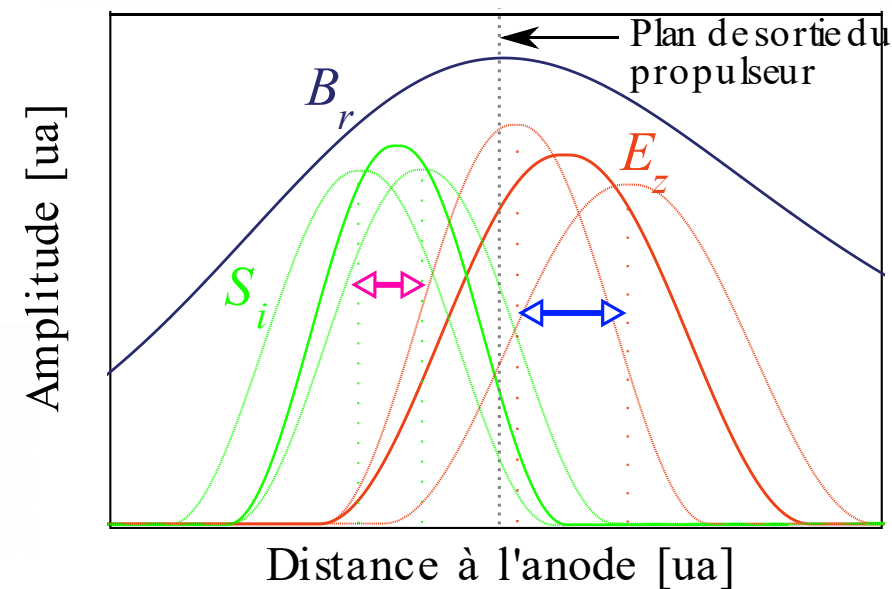


# Évolution temporelle des FDI sous l'effet des instabilités axiales

Effets des instabilités sur l'IDF : Observation d'une double dynamique



Distorsion de la FDI due à l'oscillation du breathing mode.

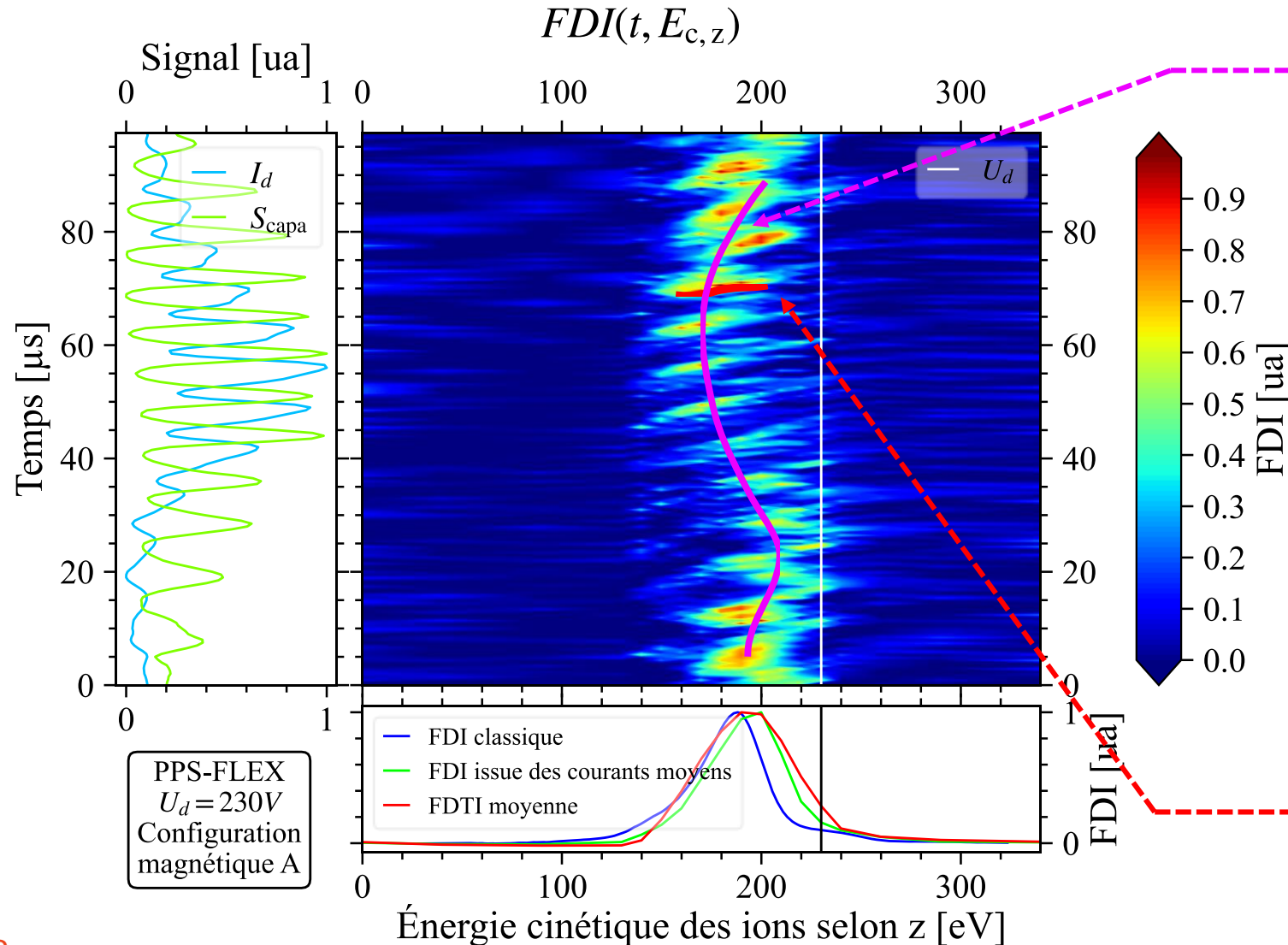


Déformation de la FDI due aux oscillations du temps de transit des ions :  
→ Accélération des ions.

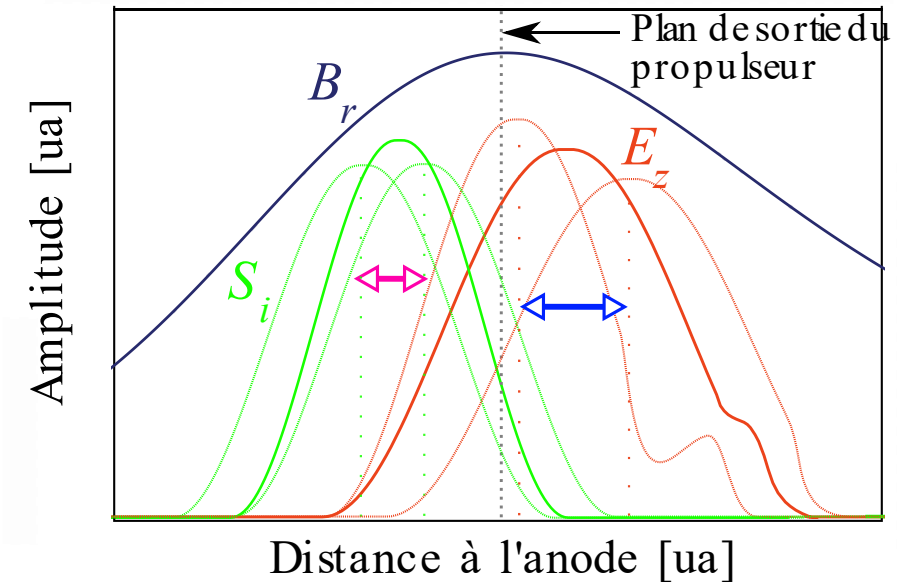


# Évolution temporelle des FDI sous l'effet des instabilités axiales

Effets des instabilités sur l'IDF : Observation d'une double dynamique



Distorsion de la FDI due à l'oscillation du breathing mode.



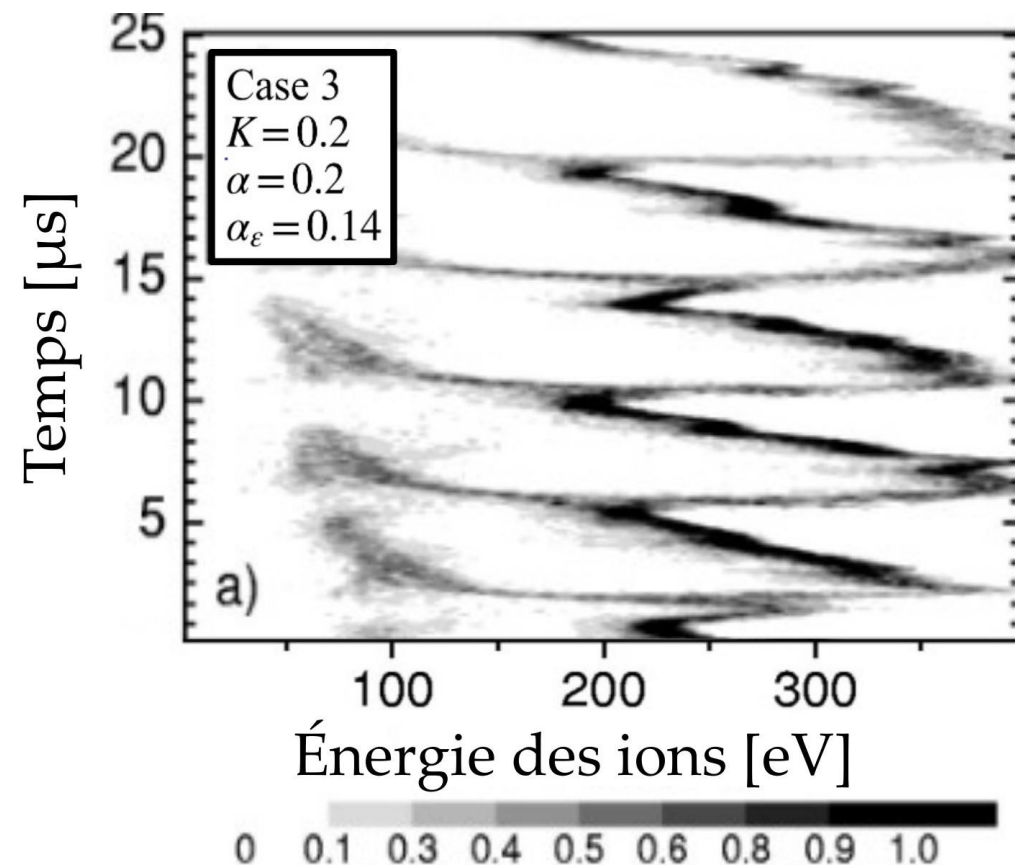
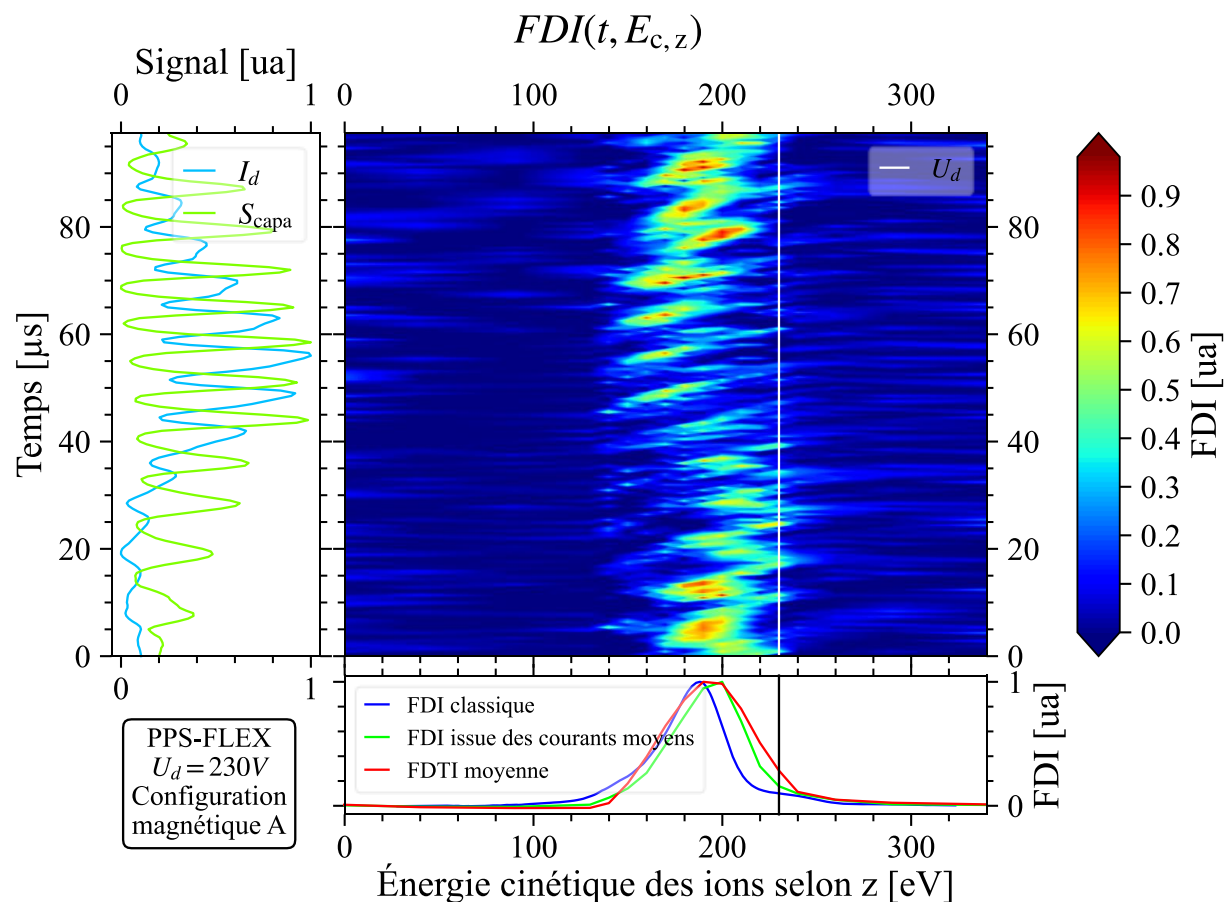
Déformation de la FDI due aux oscillations du temps de transit des ions :  
→ Accélération des ions.





# Évolution temporelle des FDI sous l'effet des instabilités axiales

Effets des instabilités sur l'IDF : Observation d'une double dynamique



\* Critical assessment of a two-dimensional hybrid Hall thruster model: Comparisons with experiments – Bareilles, Hagelaar, Garrigues et al - 2004

→ Observation d'un **comportement similaire** à la fréquence de l'ITTO entre la simulation numérique et l'expérience.

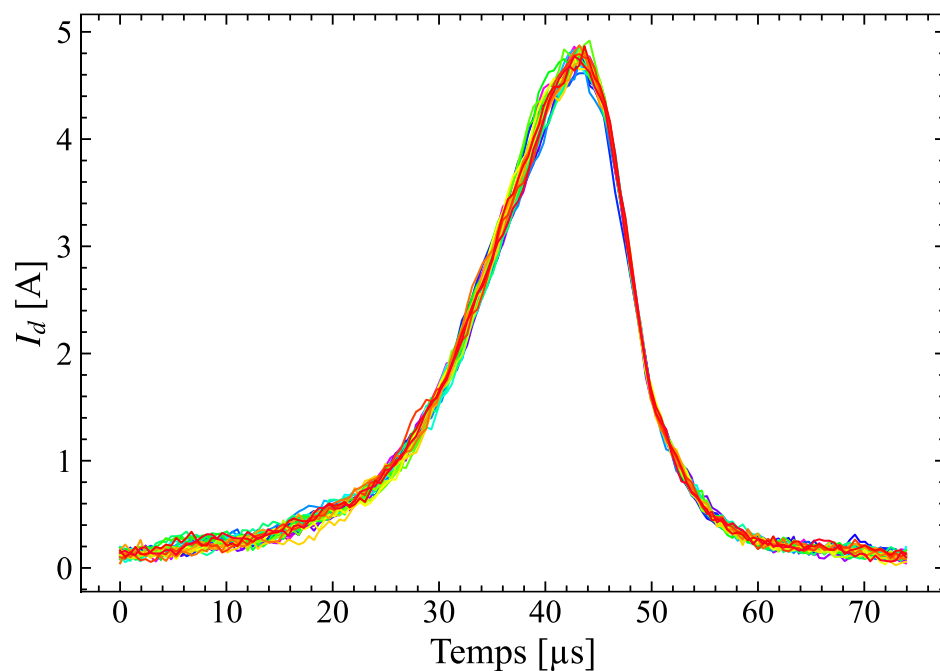
→ Et observation d'une **modification plus prononcée** de la FDI à la fréquence du BM.



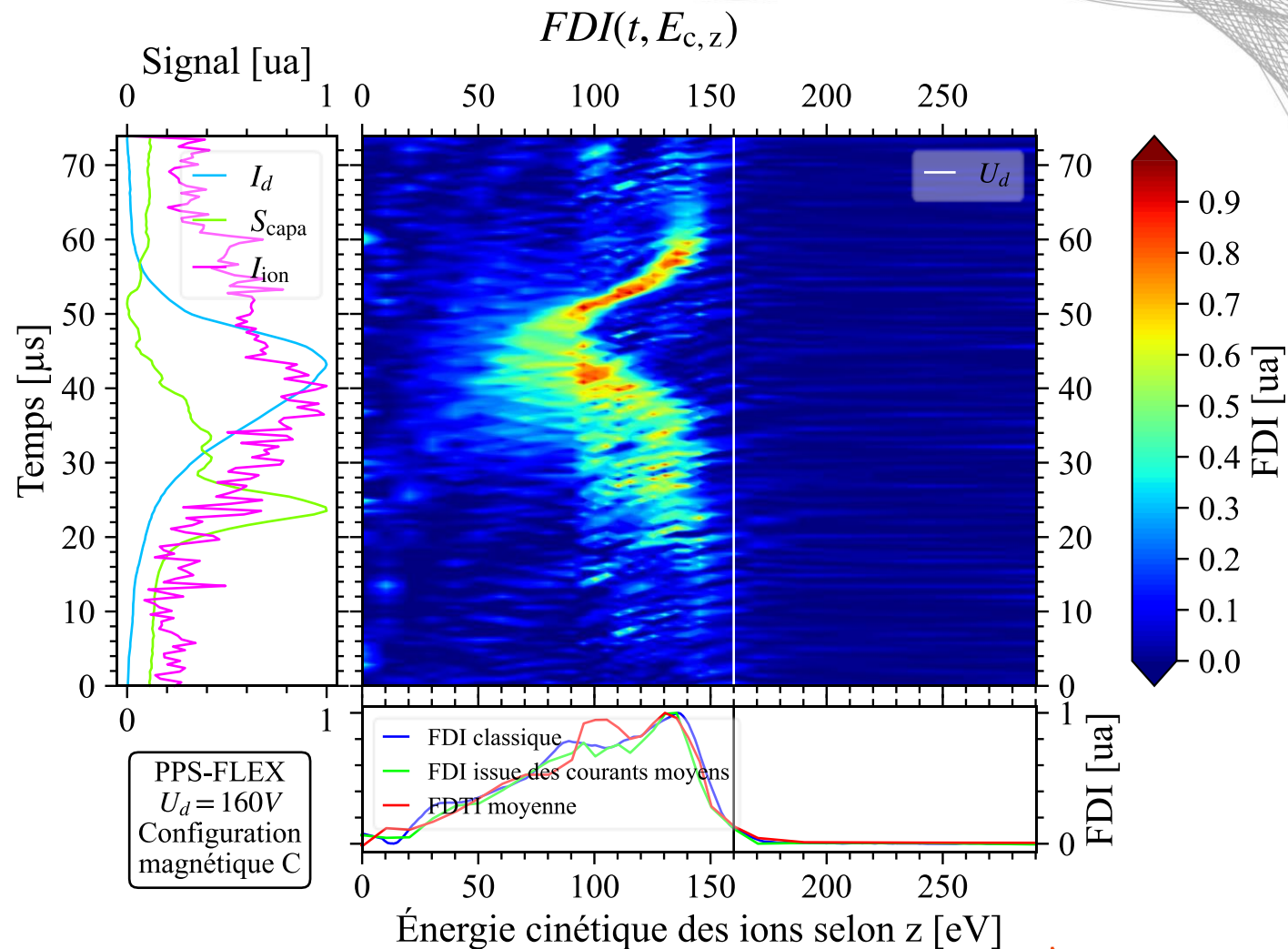


# Évolution temporelle des FDI sous l'effet des instabilités axiales

Effets des instabilités sur l'IDF : Observation de l'effet du BM seul



→ Résultat très similaire à ceux de la littérature\*.



\* Time-resolved laser-induced fluorescence measurement of ion and neutral dynamics in a Hall thruster during ionization oscillations - Lucca Fabris, Young & Cappelli - 2015





## Conclusion:

- Développement d'un algorithme de recherche des événements les plus similaires dans le temps, permettant de compenser l'irrégularité de la décharge.
- Nous observons des variations des FDI sur deux échelles de temps distinctes correspondant à deux instabilités : le breathing mode et les ITTO.
- Ces évolutions temporelles des FDI tendent à montrer que les zones d'ionisation et d'accélération évoluent spatialement et de manière non coordonnée au cours du temps.
- En accord avec les conclusions tirées grâce au code hybride 2D, avec des électrons/neutres fluides et des ions cinétiques.

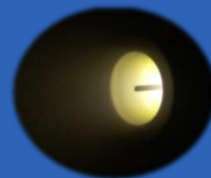


***Merci pour votre attention !  
Des questions ?***

**ONERA**

THE FRENCH AEROSPACE LAB

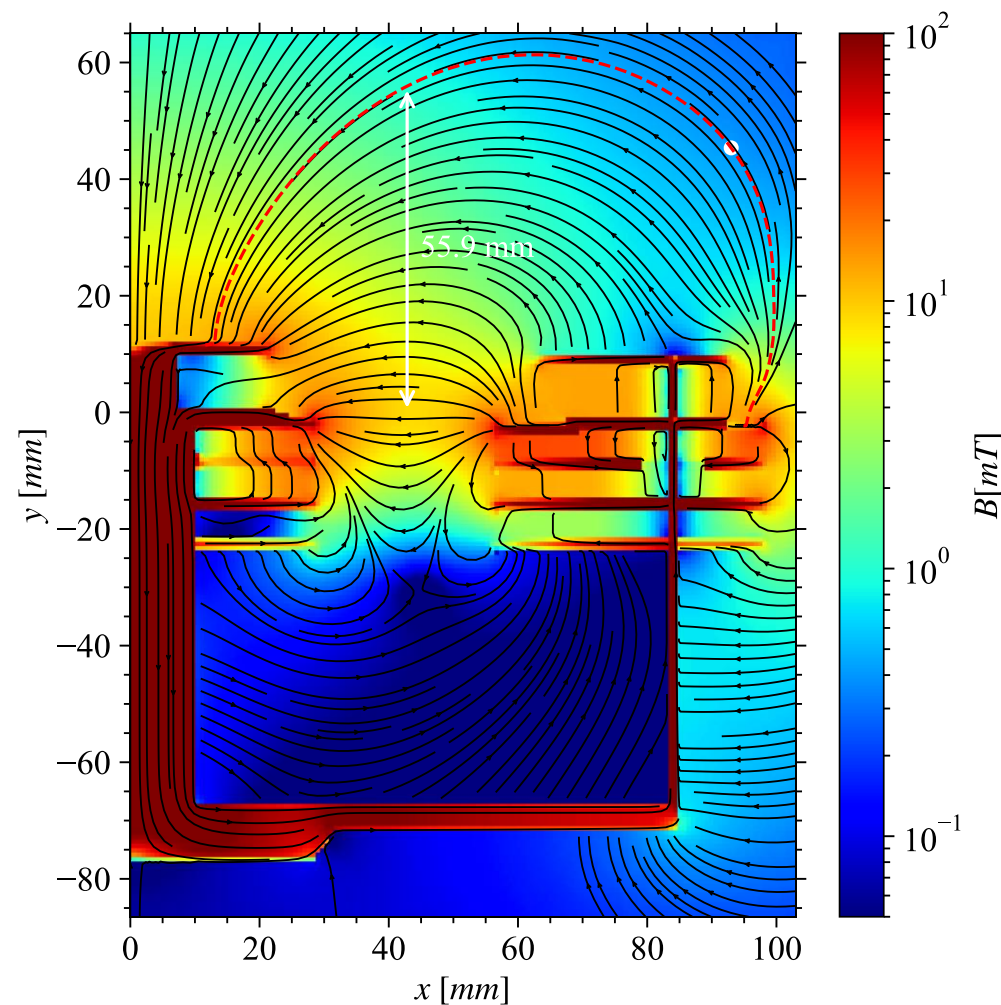
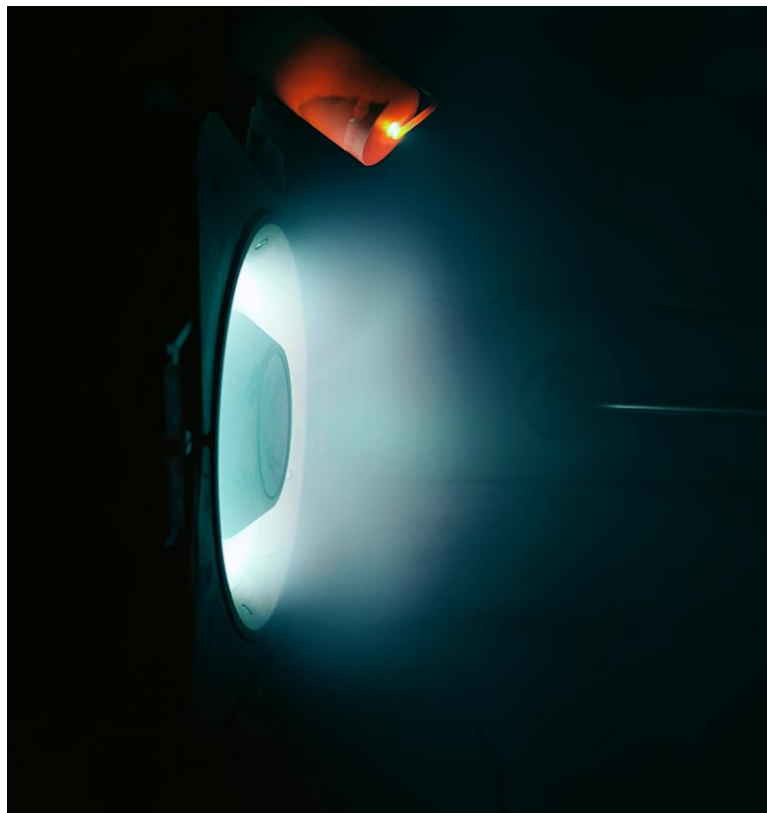
**Session poster** : ***Première  
caractérisation d'un propulseur  
ECR alimenté à l'iode***





# Moyens expérimentaux

Le PPS-FLEX, un propulseur à topologie magnétique configurable

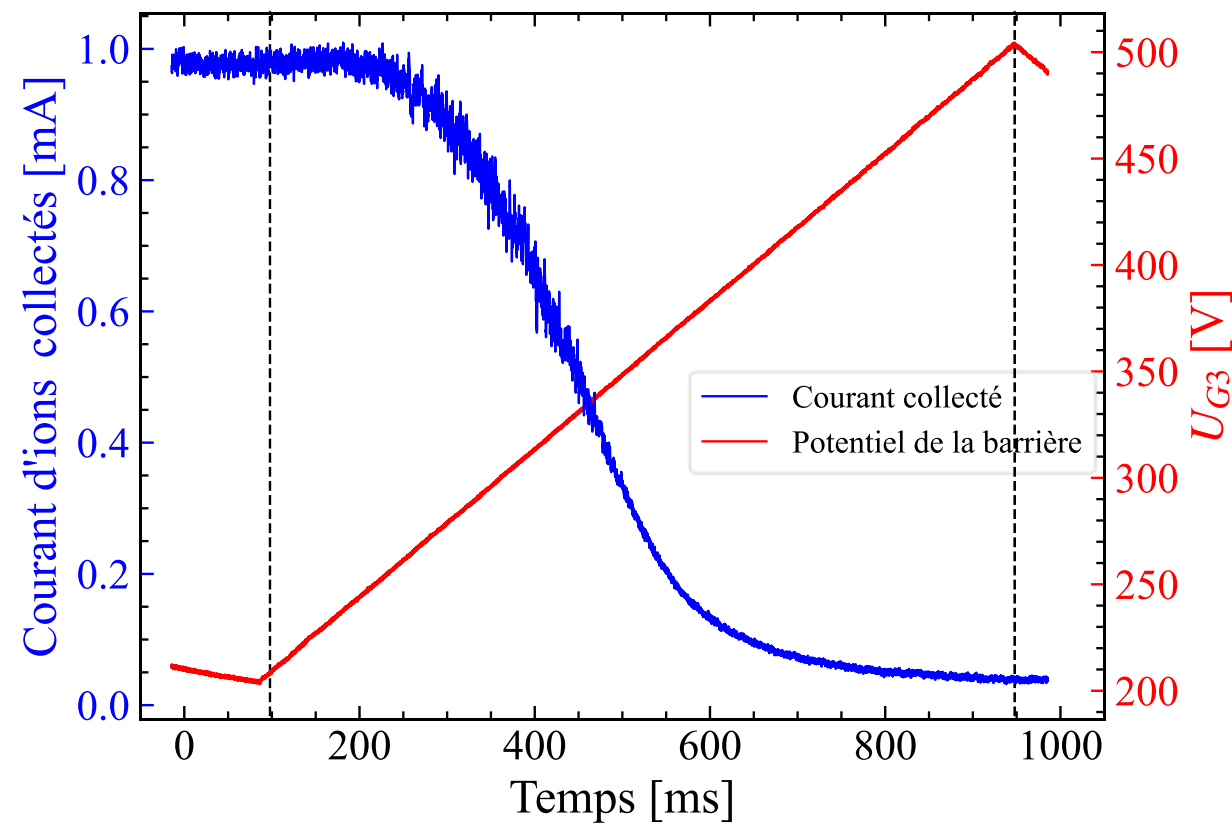
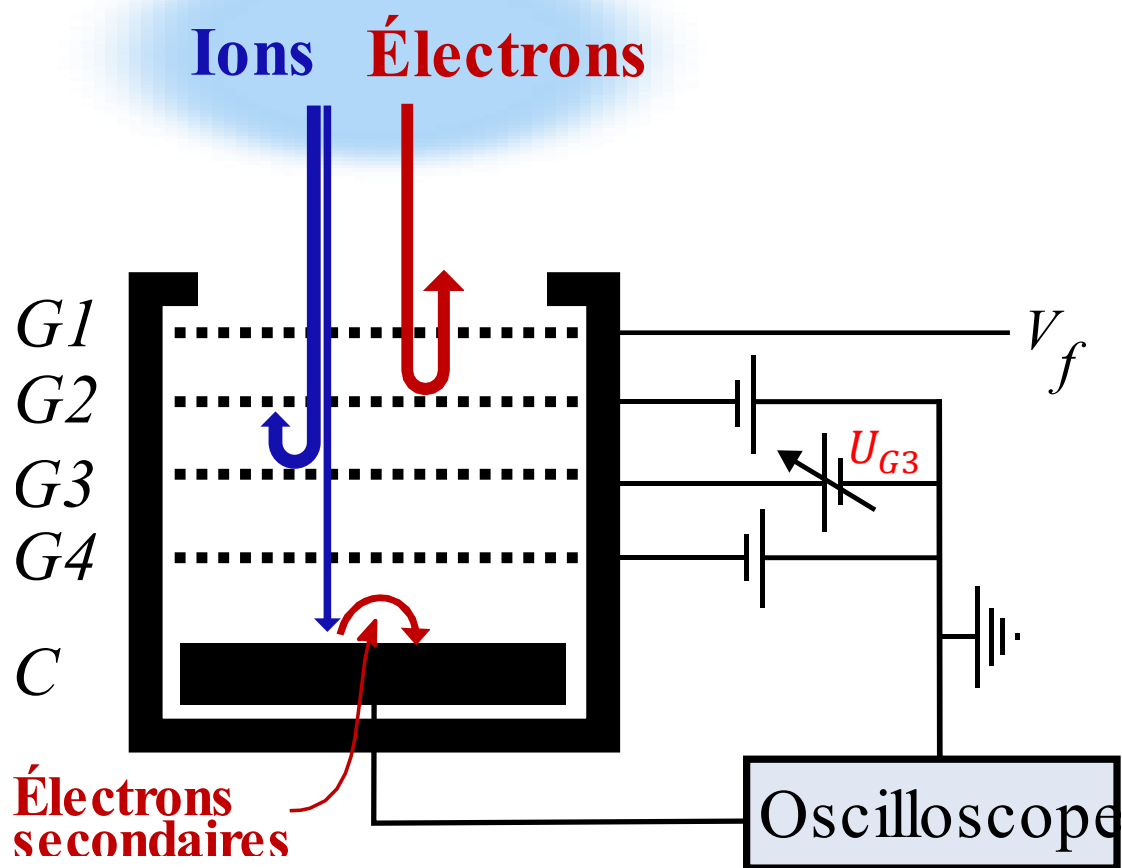


\* Design and first test campaign results with a new flexible magnetic circuit for a Hall thruster - Garrigues, Mazouffre, Hénaux, Villamot, Rossi - 33rd International Electric Propulsion Conference - 2013



# Principe de la mesure au RPA

Fonctionnement et utilisation d'un Retarding Potential Analyser (RPA)







# Introduction

Bestiaire des instabilités :

*Instabilité à deux faisceaux ion-ion (IITSI)\**

*Instabilité à deux faisceaux modifiée (MTSI)\*\**

*Rotating spoke (RS) / GDI<sup>++</sup>*

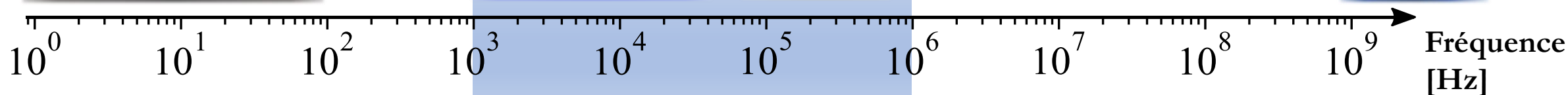
*Instabilités de dérive électronique (EDI)\*\*\**

*Changement de régime*

*Breathing mode (BM)+++*

*Instabilités au GHz\*\*\*\**

*Oscillation de temps de transit des ions (ITTO)<sup>+</sup>*



$\omega_{c,i}$

$\omega_{p,i}$

$\omega_{c,e}$

$\omega_{p,e}$

\* The ion-ion acoustic instability – Gary et Omid - 1987

\*\* An axially propagating two-stream instability in the Hall thruster plasma – Tsikata et al – 2014

\*\*\* Small-scale electron density fluctuations in the Hall thruster, investigated by collective light scattering – Tsikata - 2009

\*\*\*\* Broadband (kHz–GHz) characterization of instabilities in Hall thruster inside a metallic vacuum chamber – Mazières et al - 2022

+ Plasma oscillations in Hall thrusters – Choueiri - 2001

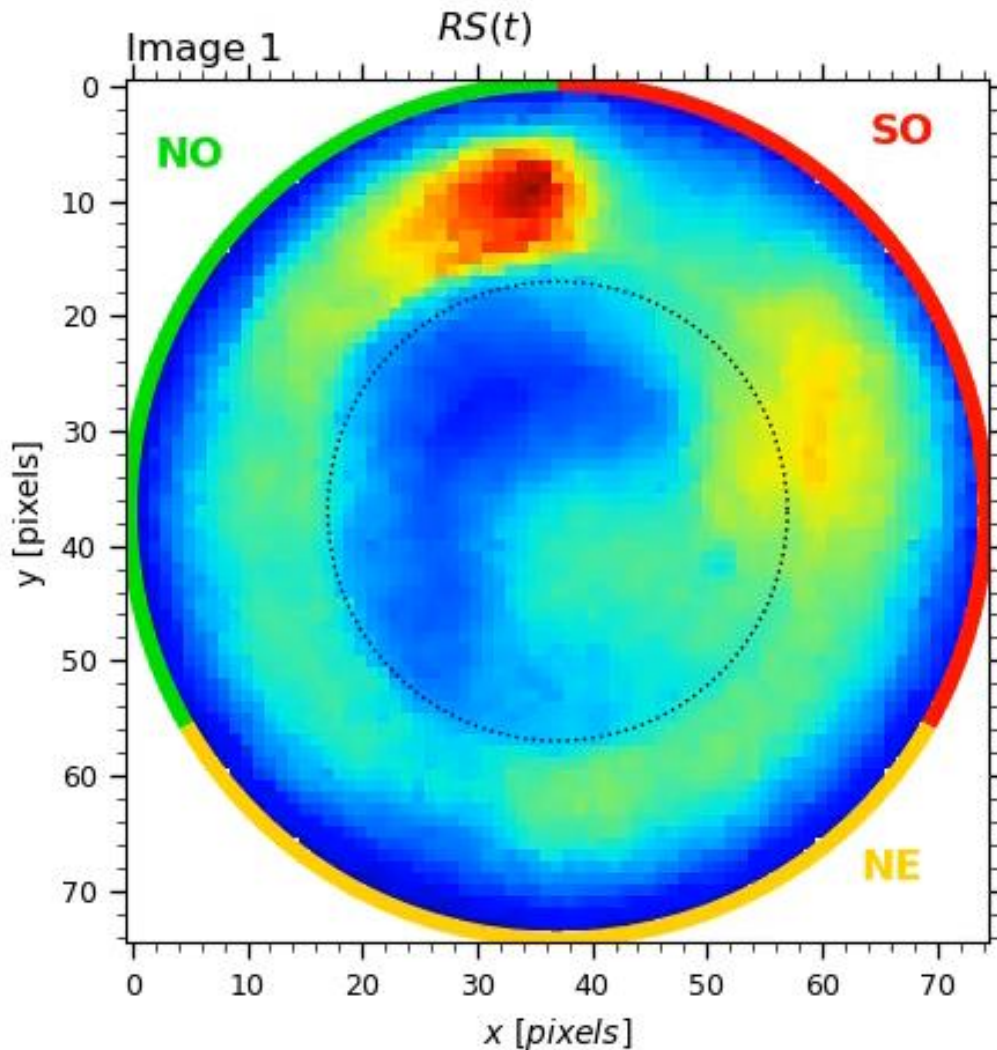
++ Anomalous Electron Diffusion and Ion Acceleration in a Low-Density Plasma – Janes et Lowder – 1966

+++ A numerical study of low-frequency discharge oscillations in Hall thrusters – Fife - 1997



# Introduction

## Signatures d'une instabilité azimuthale :



### *Les rotating spokes (5-25kHz)*

→ Les **rotating spokes (RS)** se manifestent par le biais de structures lumineuses cohérentes se déplaçant dans la direction azimuthale du canal avec une **vitesse inférieure d'un ordre de grandeur** à celle du courant de dérive (5-25kHz) .

→ Les RS sont accompagnés de fluctuations du courant de décharge. L'utilisation d'**anode segmentée** a permis d'attribuer au passage du **spoke environ 50% du courant de décharge** alors qu'il ne représente qu'environ  $\frac{1}{4}$  de la surface de la décharge.

→ Un **couplage avec le breathing mode** est possible, le RS suit alors une **trajectoire hélicoïdale\***.

### *Les instabilités de dérive électronique (~MHz) :*

→ Elles sont aussi liées au **transport anormal des électrons** dans la **direction axiale** à travers la barrière électronique\*\*.

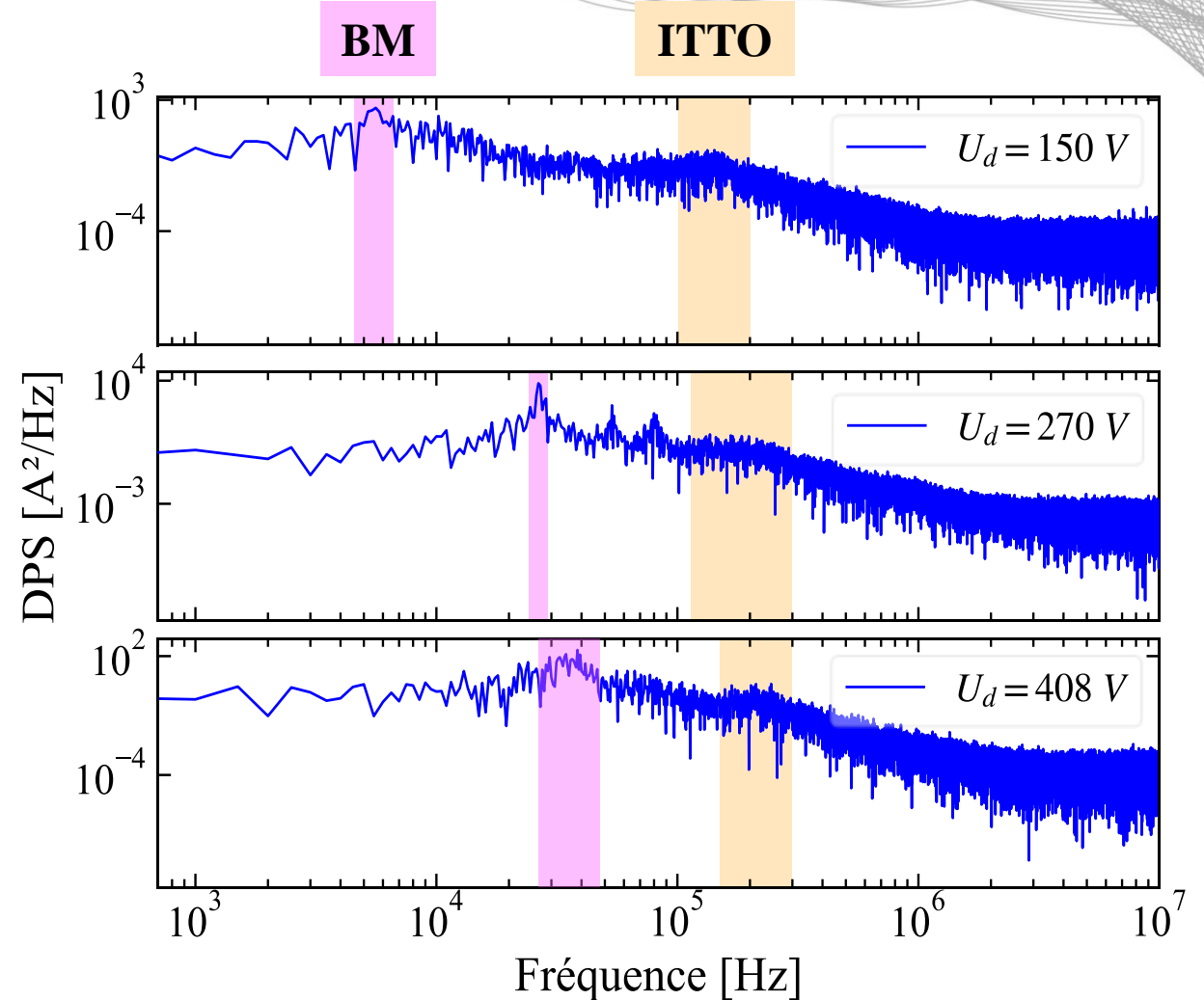
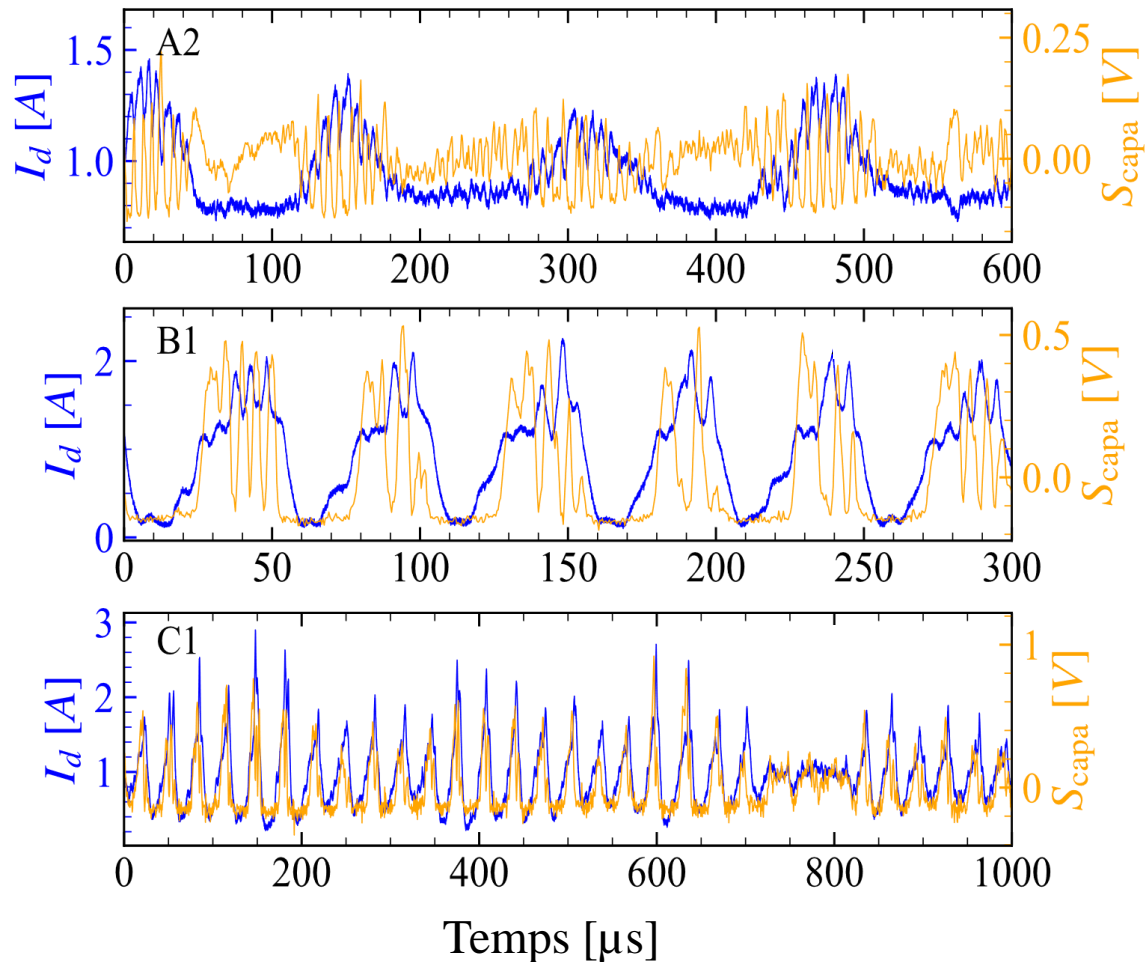
\* *Simultaneous measurements of axial motion and azimuthal rotation of non-uniformities ("spokes") in a Hall thruster – Guglielmi, Gaboriau & Boenf – 2022*

\*\*  *$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  electron drift instability in Hall thrusters: Particle-in-cell simulations vs. theory – Boenf & Garrigues - 2018*



# Régimes d'oscillations

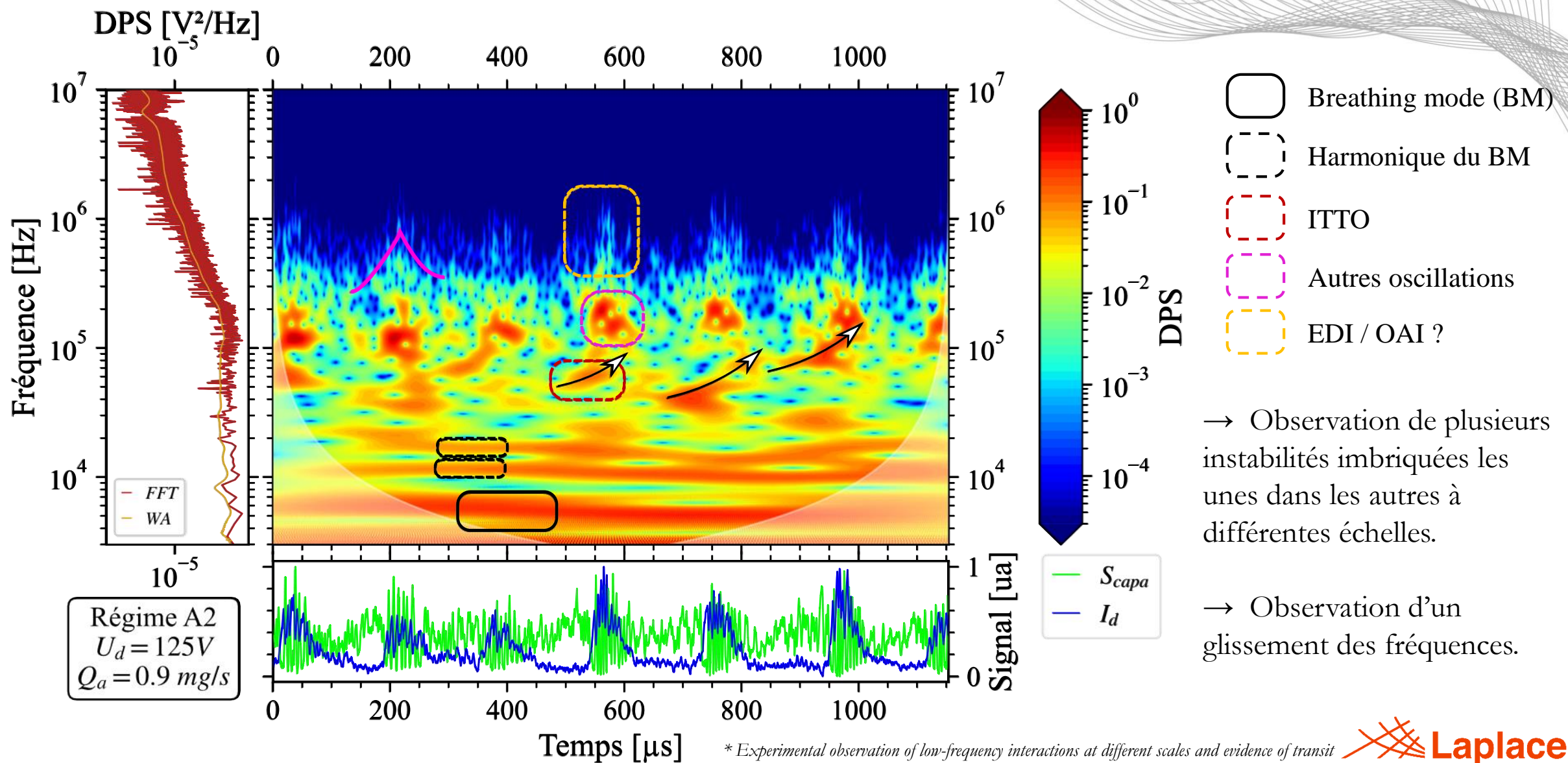
Signaux et spectres des signaux en fonction du régime d'oscillation



→ La non périodicité des oscillations est une limite du calcul des spectre de Fourier, à la place nous pouvons effectuer une analyse temps-fréquence.



# Analyse temps-fréquence



\* Experimental observation of low-frequency interactions at different scales and evidence of transit time oscillations in a Hall thruster: Spectral analysis – Delavière—Delion et al - 2024