

Journées des L.A.R.D 2026

**Caractérisation primaire de la μ TPC dans les champs de neutrons à 565 keV
et comparaison avec les instruments de référence.**

Extension de la méthode à la plage 565 keV – 7 MeV

 **Identification des noyaux de recul et évaluation de la complétude de
charge par analyse graphique et machine learning**

Directeur de thèse : Michaël PETIT

Co-directrice de thèse : Christelle Reynard-Carette

Encadrant de thèse : Amokrane ALLAOUA

Laboratoire d'accueil : ASNR / LMDN

Contexte

Le laboratoire de micro-irradiation, métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN)



- Références métrologiques françaises pour les distributions énergétiques de fluence neutronique et des grandeurs dosimétriques associées

① AMANDE (Accélérateur)

- Un accélérateur d'ion produisant un champ de neutron quasi mono-énergétique de 2 keV à 20 MeV



AMANDE (Installation)

② CEZANE (Sources de neutrons)

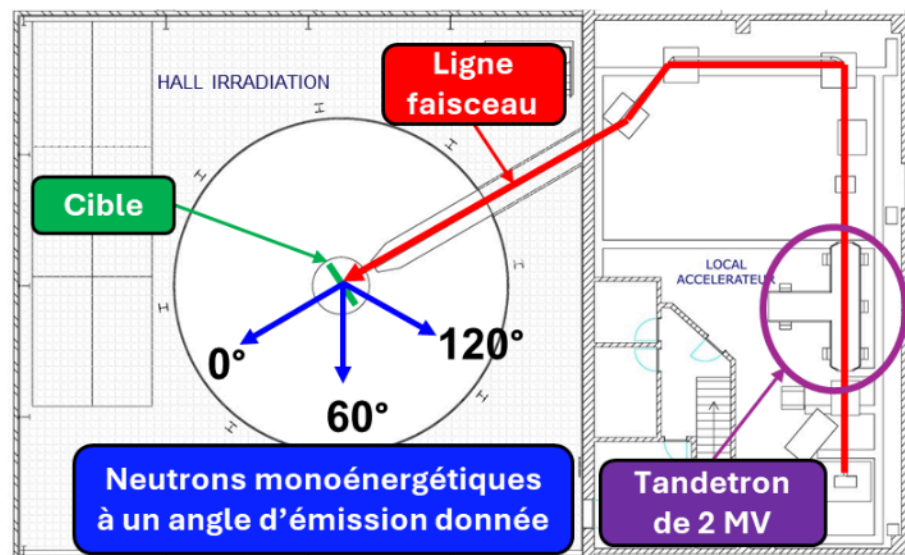
- 2 Sources de neutrons (^{252}Cf et $^{241}\text{AmBe}$) de référence pour l'étalonnage de dosimètres et dispositifs de détection de neutrons (accréditation COFRAC)



CEZANE (Installation)

Caractérisation des champs de neutrons monoénergétiques d'AMANDE

AMANDE (Accélérateur pour la Métrologie et les Applications Neutron en Dosimétrie Externe)



Faisceau de particules incidentes	Cibles	Réactions	Énergie des neutrons (recommandé par ISO 8529)
Protons	Scandium	$^{45}\text{Sc}(p,n)^{45}\text{Ti}$	24 keV
	Lithium	$^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$	144 keV 250 keV <u>565 keV</u>
	Tritium	$^3\text{H}(p,n)^3\text{He}$	1,2 MeV 2,5 MeV 2,8 MeV
Deutons	Deutérium	$^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$	5,0 MeV
	Tritium	$^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$	14,8 MeV 19,0 MeV



Caractérisation primaire de la μTPC de 565 keV à 7,0 MeV :

- 5 énergies de la norme ISO 8529 : 565 keV, 1,2 MeV, 2,5 MeV, 2,8 MeV et 5,0 MeV
- D'autres énergies importantes des neutrons : 900 keV, 3 MeV, 4,0 MeV, 6,0 MeV et 7,0 MeV



Comparaison avec les instruments de référence

La métrologie : système d'unités SI et étalons de mesures

Le Système International d'unités se compose de :

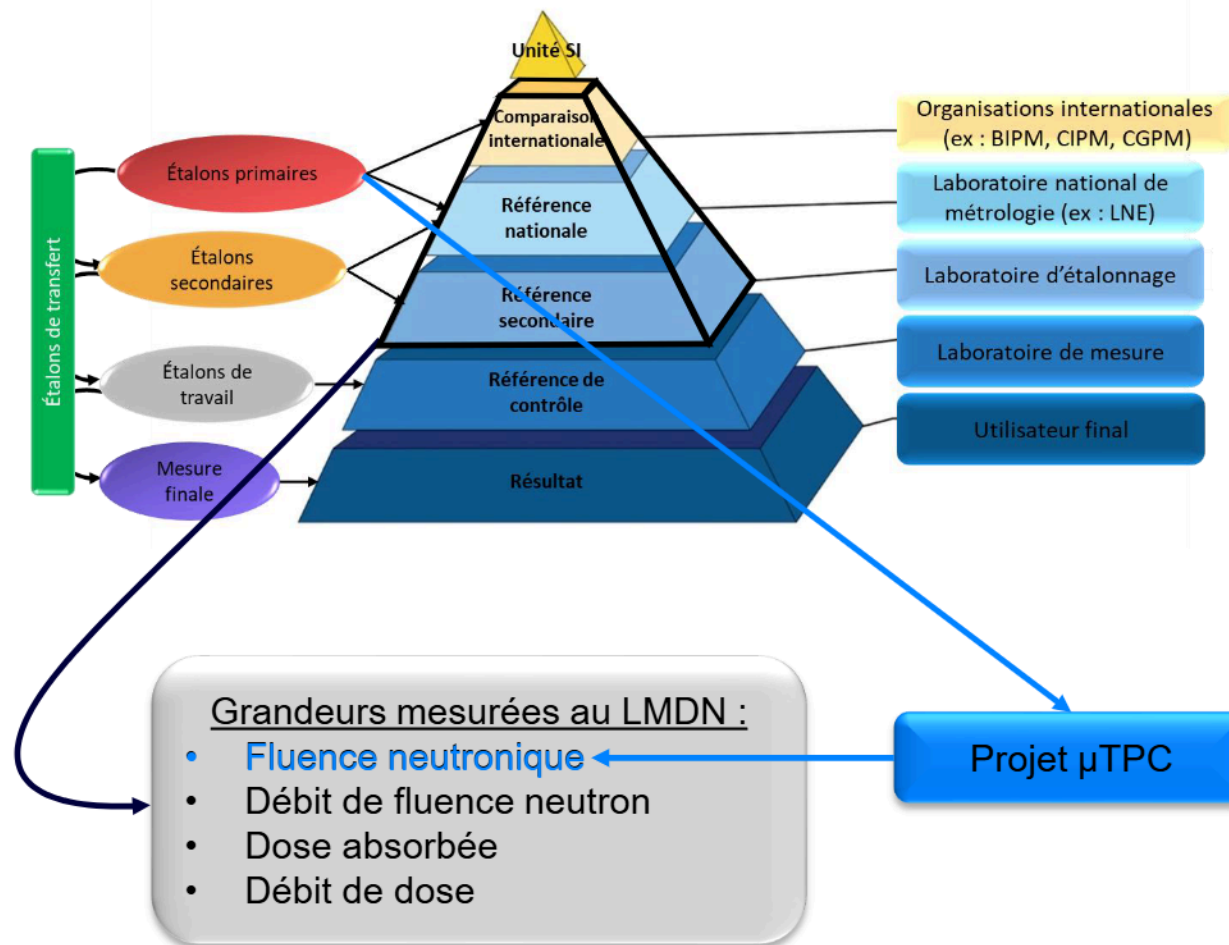
- 7 unités de base définies à partir des constantes physiques



- Unités dérivées

(ex : Unités pour la radioactivité et les rayonnements ionisants)

Grandeur	Unité et Symbole SI	Définition
Activité	Becquerel, Bq	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$
Dose absorbée	Gray, Gy	$1 \text{ Gy} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Dose équivalente ou Dose efficace	Sievert, Sv	$1 \text{ Sv} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$



Grandeur de mesure étudiée

Détermination de la distribution énergétique de la fluence neutronique en utilisant les unités.

L'équation principale est la suivante :

Diagram illustrating the equation for neutron fluence $\Phi(E)$:

$$\Phi(E) = \frac{N_e(E)}{N_c \times \sigma(E)}$$

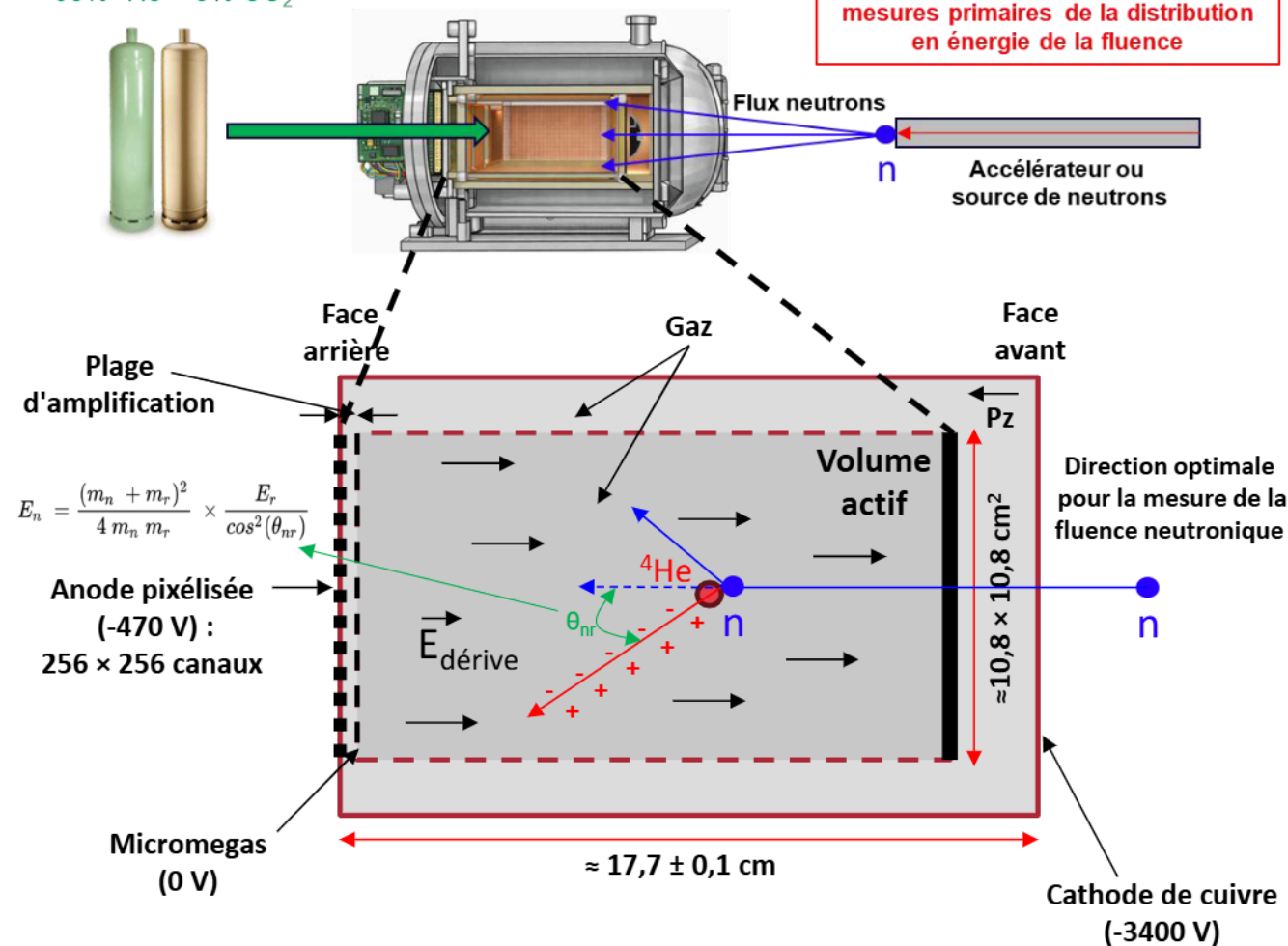
Definitions:

- N_e = Nombre d'évènements
- $\Phi(E)$ = Fluence neutronique
Valeur cible (m^{-2})
- N_c = Nombre de noyaux cibles
Déterminé dans la μTPC en se basant sur :
 - Volume (m^3)
 - Pression ($\text{Pa} : \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)
- Section efficace (m^2)
et Distribution angulaire

Présentation du dispositif μ TPC et des observables

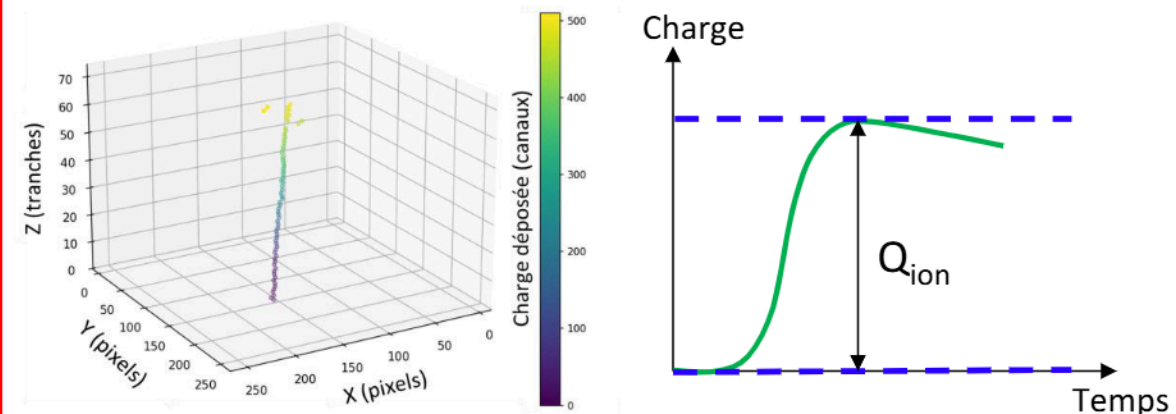
95% ^4He + 5% CO_2

Objectif du dispositif : faire des mesures primaires de la distribution en énergie de la fluence

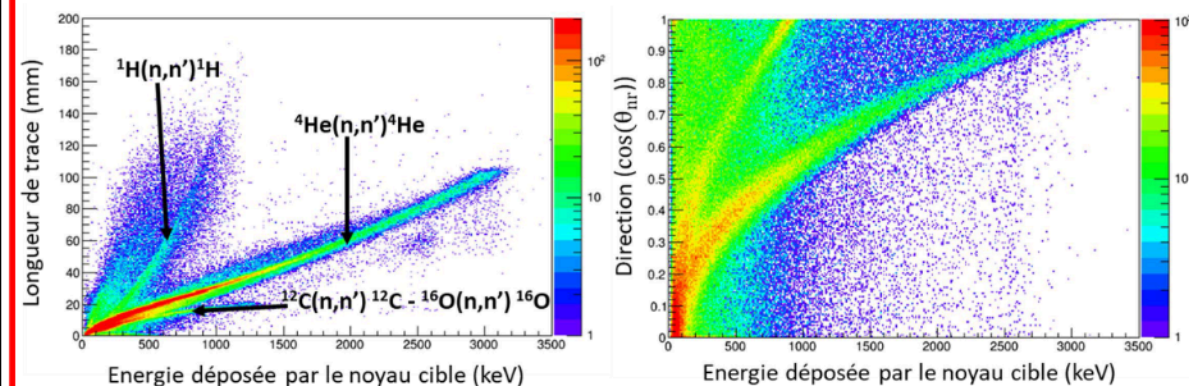


Observables

Pixellisation de la trace et charge totale déposée



Longueur de trace et direction de recul en fonction de l'énergie déposée



Identification des noyaux de recul par analyse graphique

Equation de diffusion élastique :

$$E_n = \frac{(m_n + m_r)^2}{4 m_n m_r} \times \frac{E_r}{\cos^2(\theta_{nr})}$$

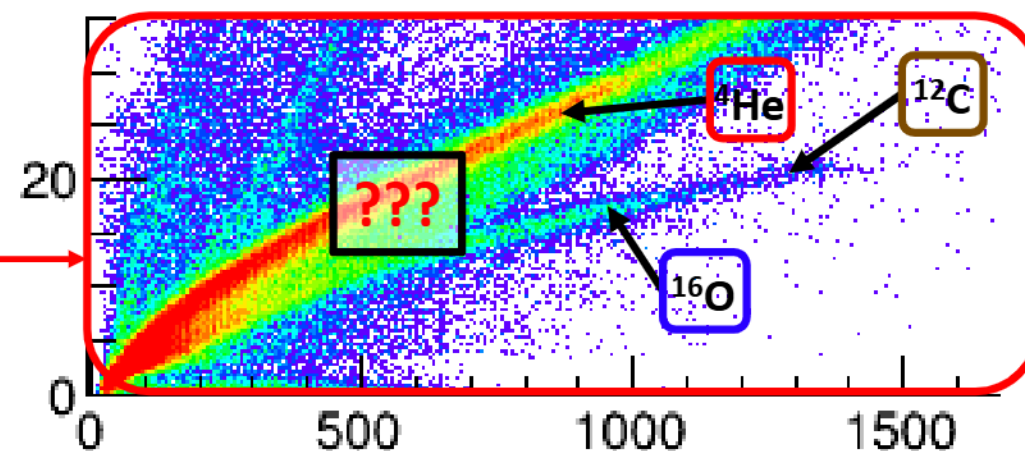
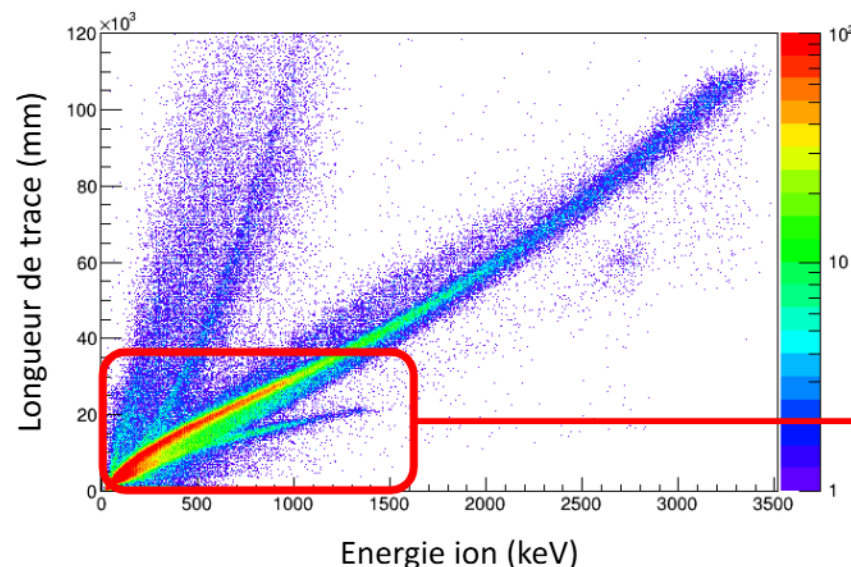
Atome	Fraction d'énergie maximale transférée
^1H	1,000
^4He	0,640
^{12}C	0,284
^{16}O	0,221

Pour $E_n = 5 \text{ MeV}$

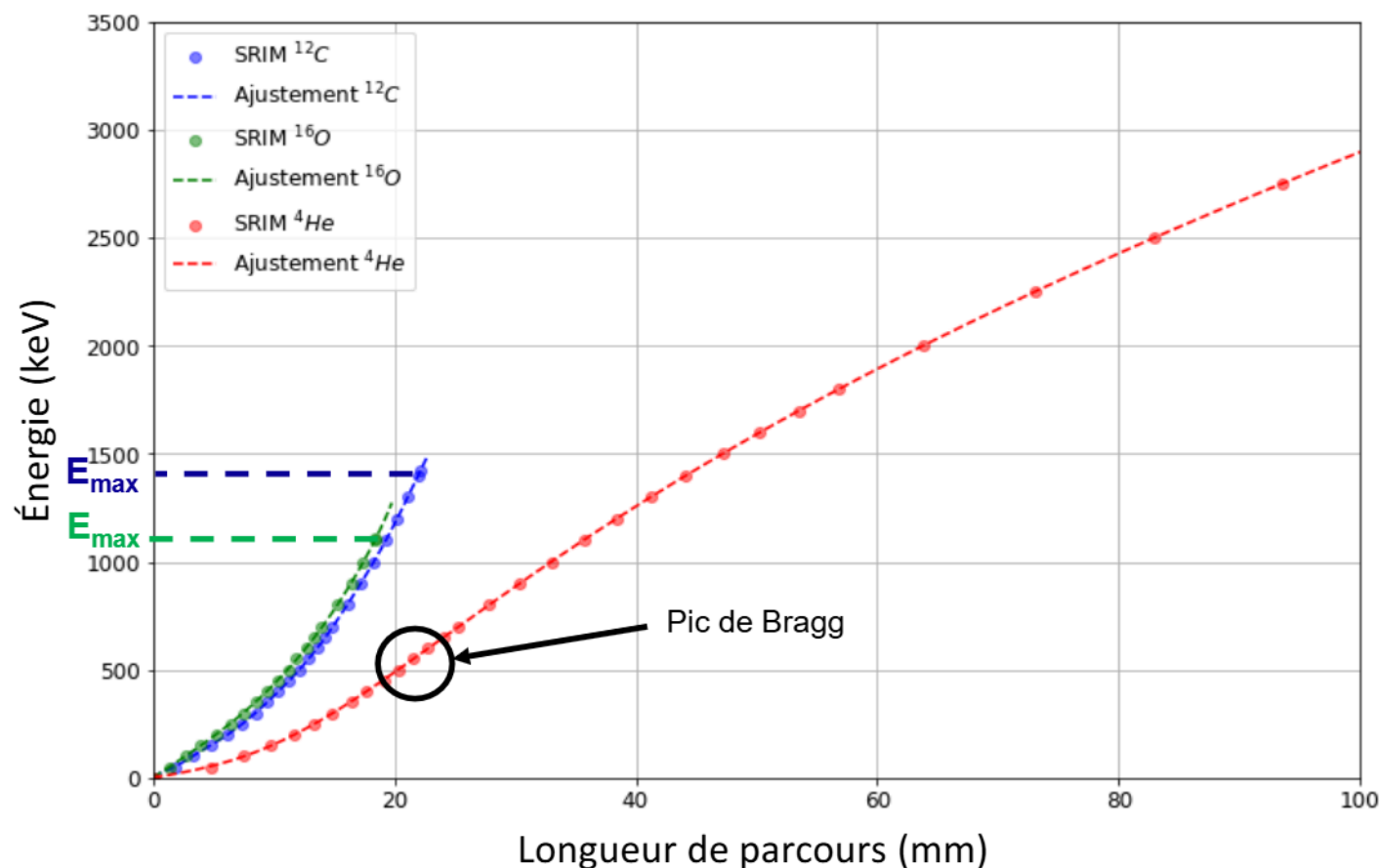
$E(^4\text{He}) = 3,20 \text{ MeV}$

$E(^{12}\text{C}) = 1,42 \text{ MeV}$

$E(^{16}\text{O}) = 1,11 \text{ MeV}$



Identification des noyaux de recul par simulations



➤ Identification possible des noyaux de recul de ^4He par rapport aux ^{12}C et ^{16}O jusqu'à 50 keV environ



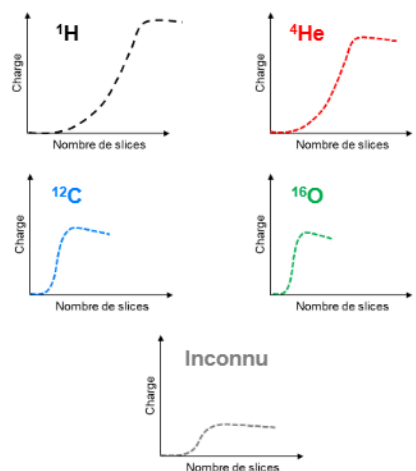
Utilisation de machine learning ou/et de l'IA pour combler les difficultés d'analyse graphique

Machine learning (modèle, données, étapes)

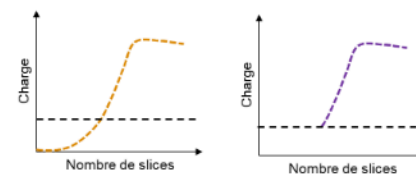
Données étiquetées
(Expérimentales + SRIM)

1. Données d'entrée

Profil de charge
→ **Identification du noyau**



Profil de charge
→ **Complétude de charge**



2. Extraction des paramètres

(pour chaque événement)

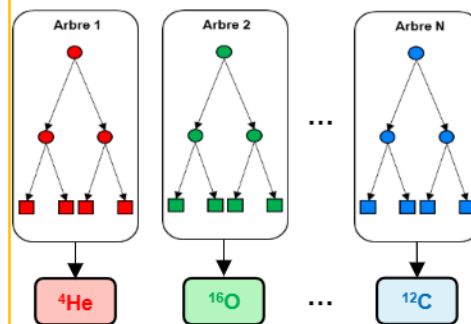
- Charge totale
- Charge maximale
- Nombre de slices
- Direction
- Position
- Temps de montée
- Paramètres ajustement exp
- Paramètres ajustement SRIM
- ...

Matrice des caractéristiques
(N événements × M paramètres)

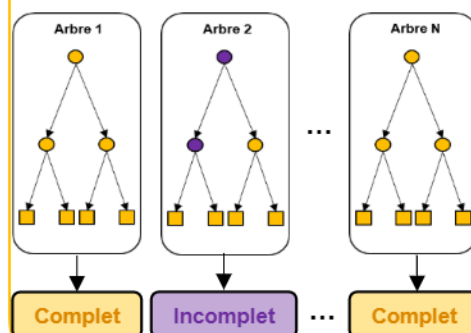
	x_1	x_2	x_3	...	x_M	Noyau	Complétude
Ev 1	...	...	...	...	...	^1H	Complet
Ev 2	...	...	...	...	...	^4He	Incomplet
Ev 3	...	...	...	...	...	^{12}C	Complet
Ev 4	...	...	...	...	...	^4He	Complet
Ev 5	...	...	...	...	...	^{16}O	Incomplet
...	...	...	...	...	...	...	...

3. Modèle Random Forest Classification

Noyau : 5 classes

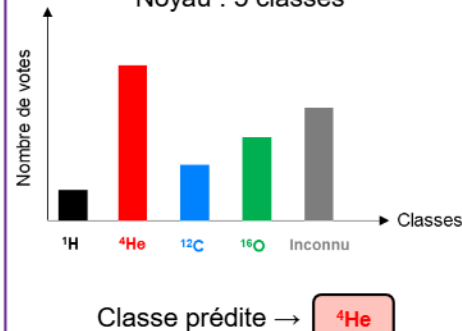


Complétude : 2 classes



4. Vote d'identification

Noyau : 5 classes



Complétude : 2 classes

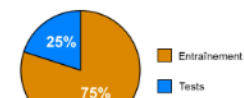


5. Résultat final

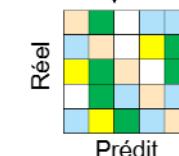
Sortie combinée



6. Entraînement et évaluation des modèles



Noyau → Complétude
Entraînement des 2 modèles



Validation croisée et évaluation finale

Machine learning (Données d'entrée et extraction des paramètres)

Exemple : 1 trace de ^4He de $\approx 3,2$ MeV

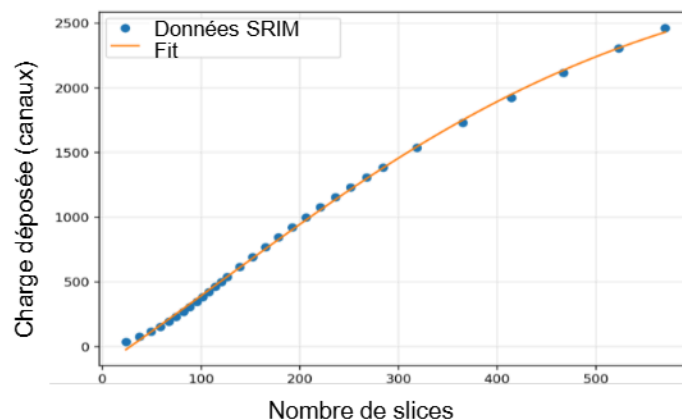
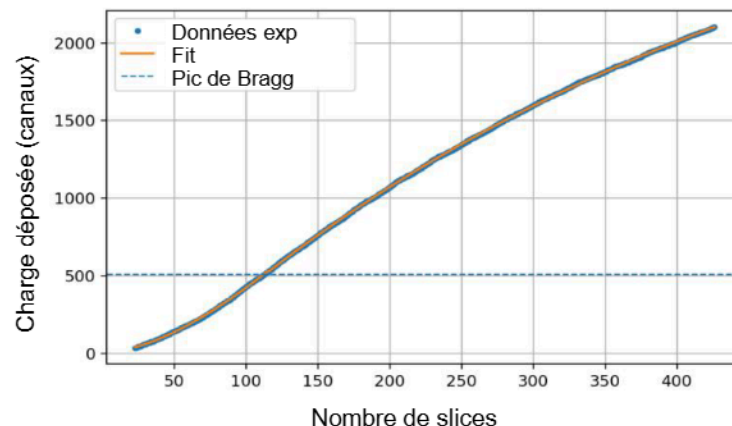
2 choix de fits possibles :

Fit exponentiel

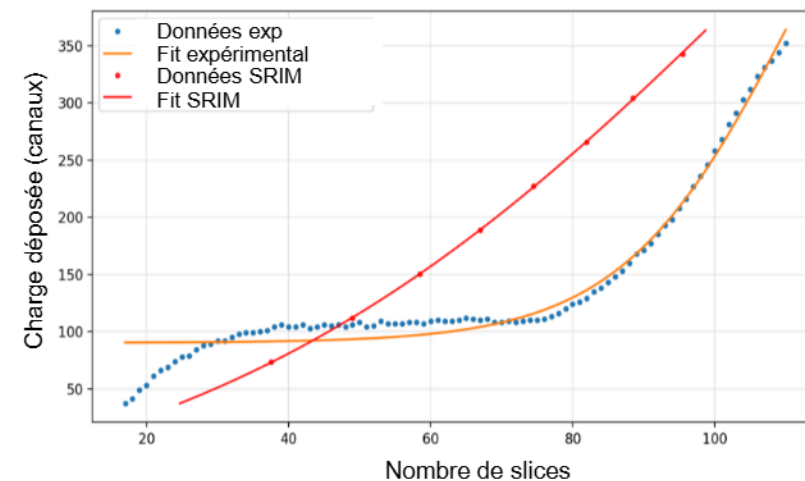
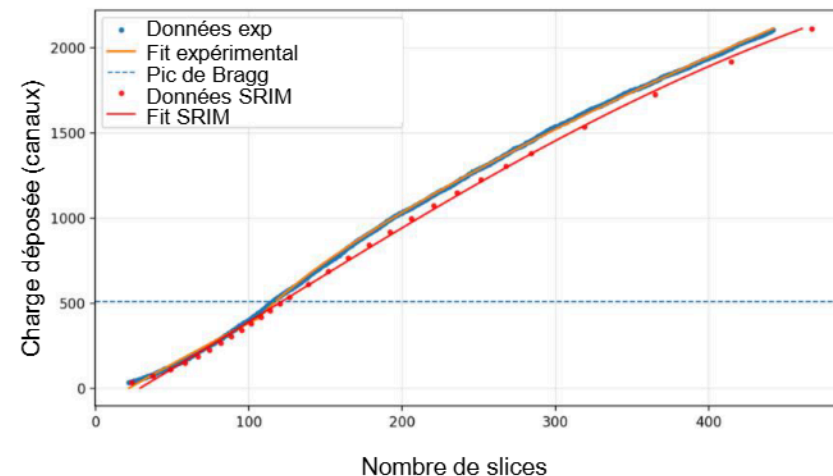
$$y(t) = y_0 + A \left(1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right)$$

Fit sigmoïde

$$y(t) = y_0 + \frac{A}{1 + \exp\left(-\frac{t-t_m}{k}\right)}$$



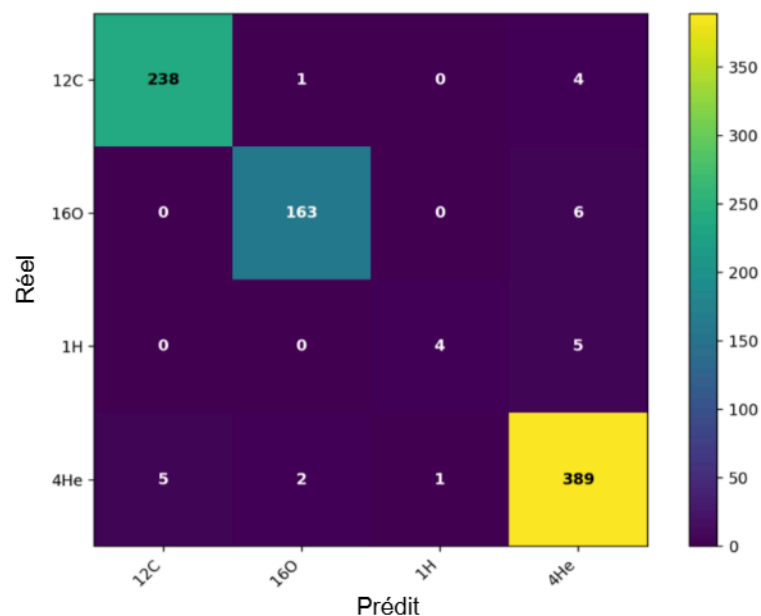
Comparaison des profils de charge
(Exp et complet vs SRIM et complet)



Machine learning (Résultats de la phase d'entraînement)

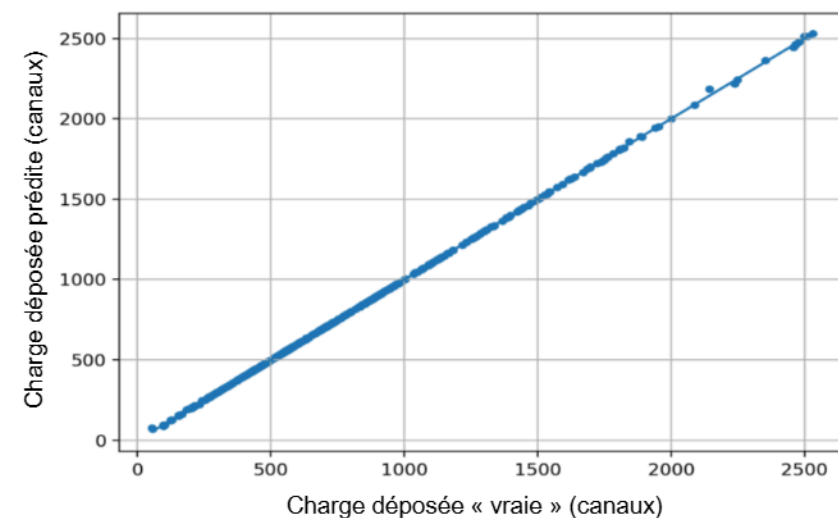
Modèle Random Forest : Classification

Matrice de réponse – Identification du type
de noyau de recul



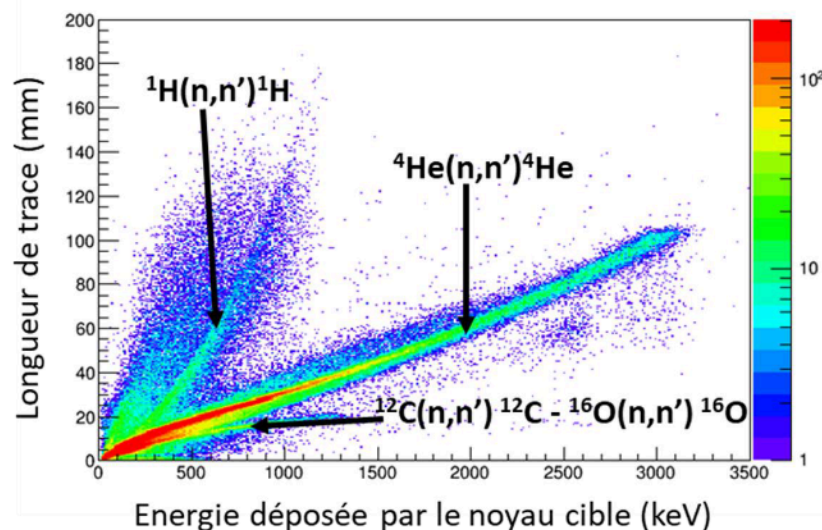
- Entraînement → classification ^4He , ^{12}C , ^{16}O plutôt satisfaisante
- Entraînement insuffisante pour le ^1H → mauvaise classification

Modèle Random Forest : Régression

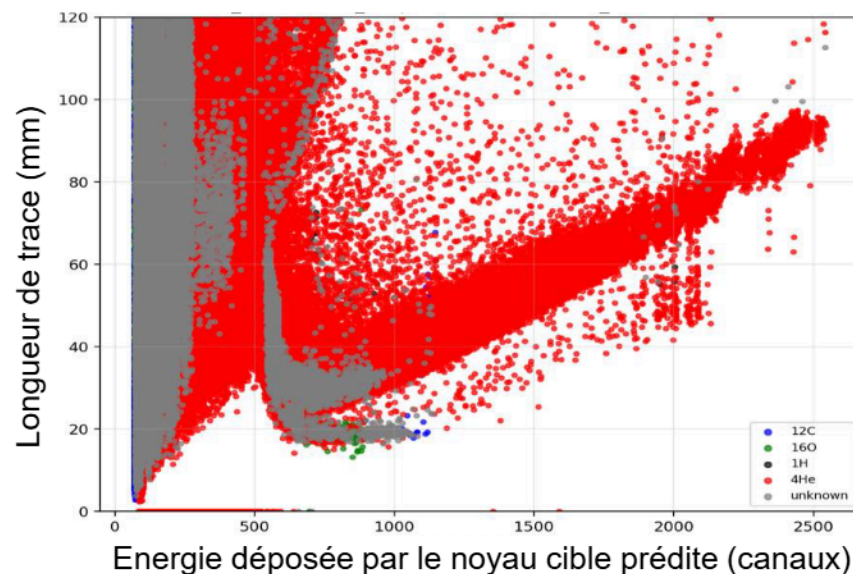
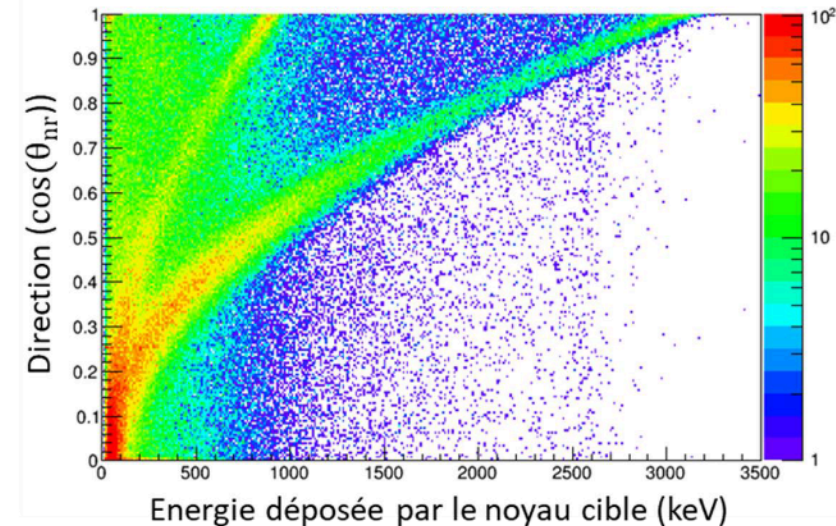


- Entraînement → bonne prédiction de la charge déposée

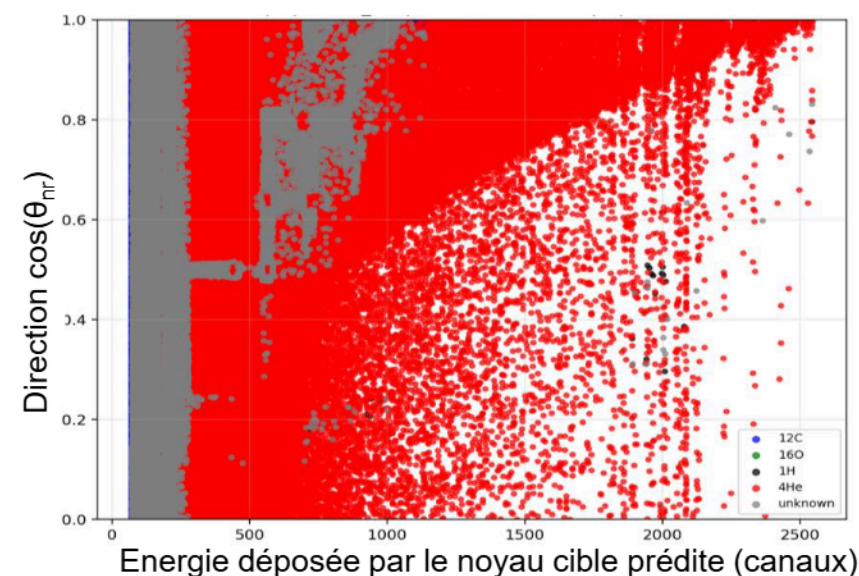
Machine learning (Résultats intermédiaires)



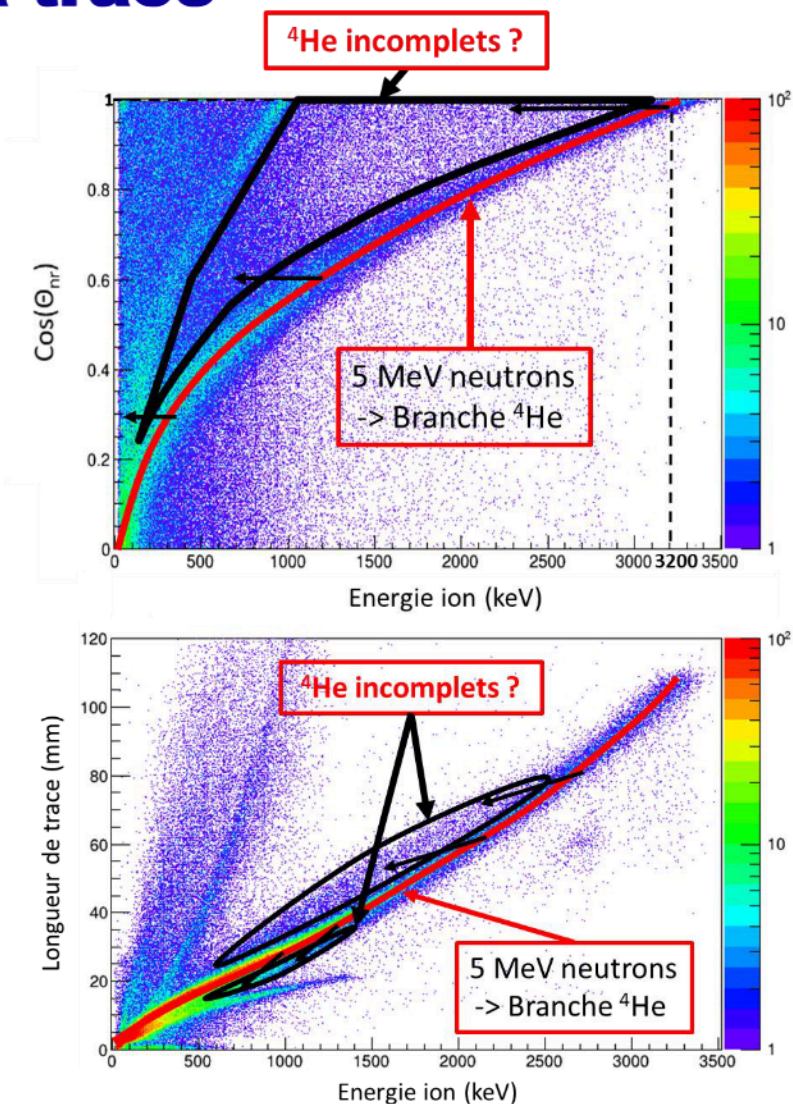
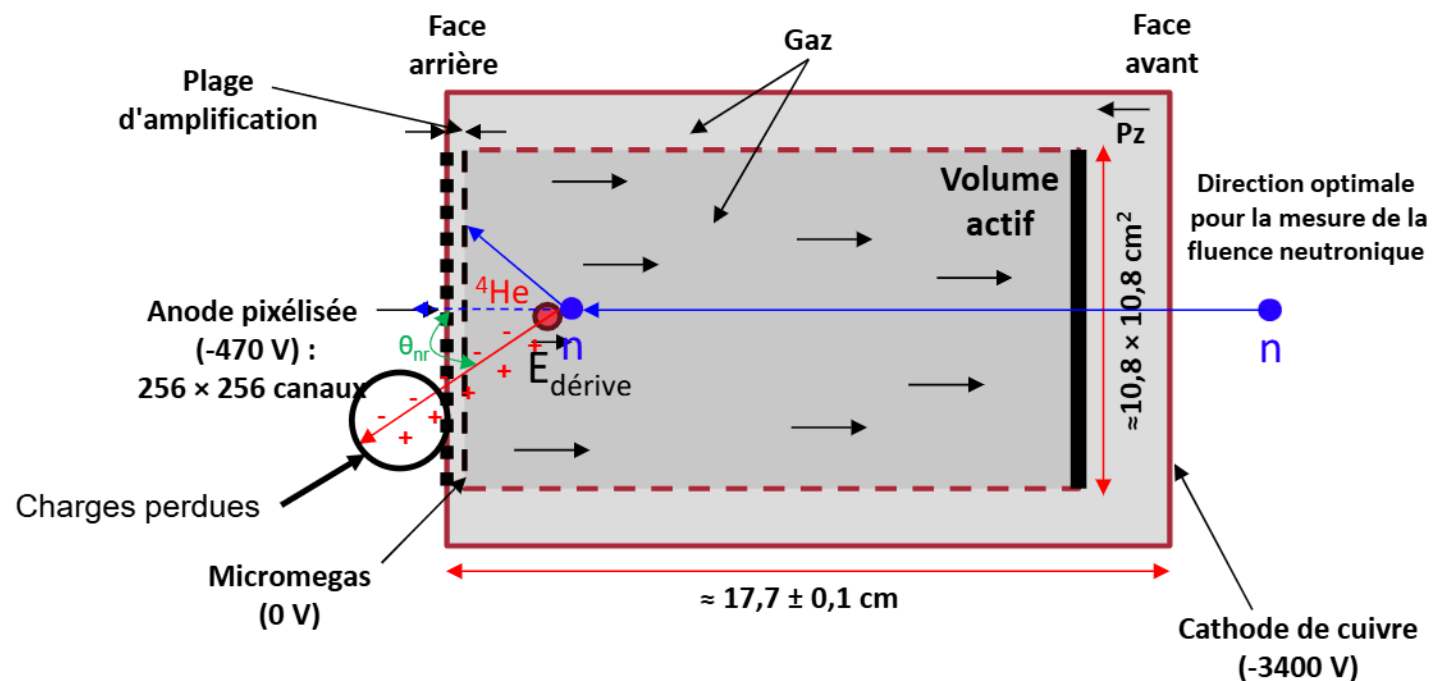
Données



Identification par le ML



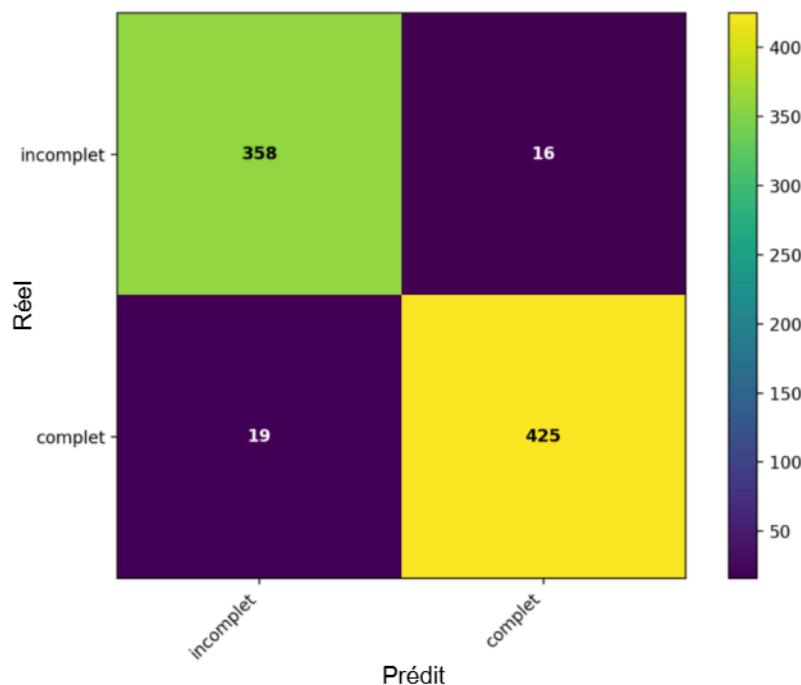
Collection incomplète de la trace



Machine learning (collection incomplète de trace)

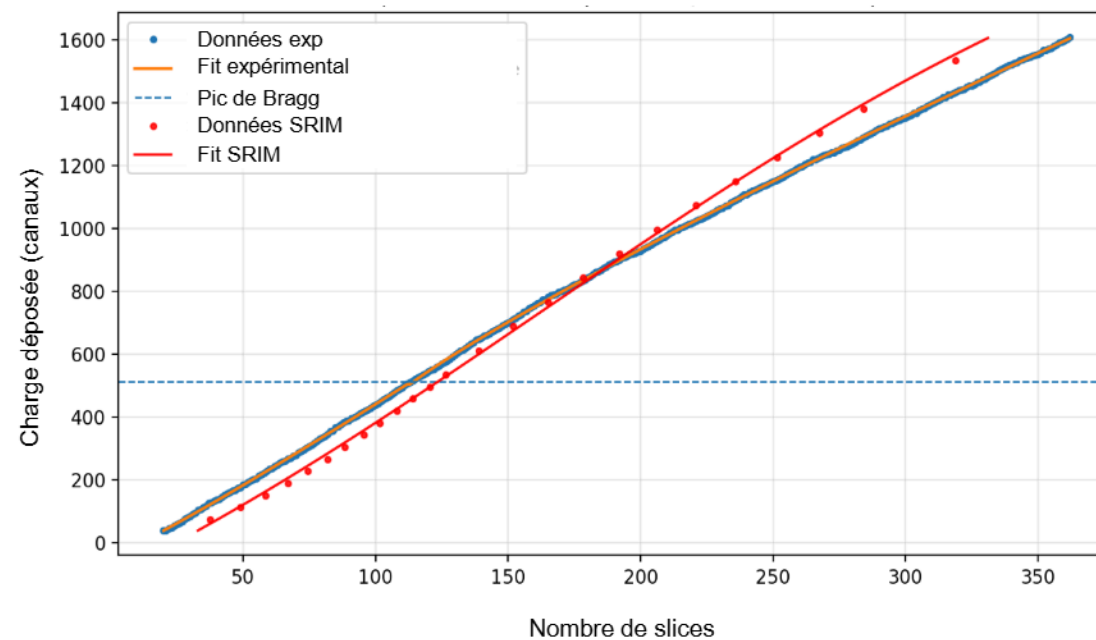
Modèle Random Forest : Classification

Matrice de réponse – Collection de charge



- Entraînement → classification complet/incomplet plutôt satisfaisante

Comparaison des profils de charge
(Exp et incomplet vs SRIM et complet)



- Inversion des tendances de montée de charge
- Conséquence : Charge collectée plus faible que la charge simulée



Origine : Dépôt de charge incomplet

Conclusion Machine Learning

Pistes d'amélioration envisagées et développements futurs :

- **Sélection des données d'entraînement** -> Sélection graphique par type de noyaux de recul et par plage en énergie
- **Quantité de données d'entraînement** (environ 100 traces (idéal >1000 traces) par énergie et type de noyau de recul
- **Rajouter une catégorie** correspondant à la pollution de la cible (?) et/ou au dépôt de bore
- **Identifier les traces incomplètes** dans les données expérimentaux
- **Estimer la proportion de traces complètes/incomplètes**
- **Reconstruire la partie manquante** des traces incomplètes

Conclusion et perspectives

1) Mesures

- ❖ Finalisation du développement du machine learning et application sur les données de la campagne expérimentale de juillet 2026 (LP2iB, Bordeaux) – Prévues pour fin 2026
- ❖ Mesures primaires de la fluence neutronique à la gamme d'étude (565 keV – 7 MeV) sur l'installation AMANDE – Prévues pour le premier semestre 2027
- ❖ Mesures primaires de la fluence neutronique à la gamme d'étude (565 keV – 7 MeV) et intercomparaison avec les instruments de référence sur l'installation PTB (Allemagne) – Prévues pour le premier semestre 2028

2) Dispositif de mesures

- ❖ Développement d'un dispositif de mesures de sections efficaces (DAMSEG) via la mesure d'atténuation de fluence neutronique – Prévues pour 2027-2028

3) Publications envisagées

- ❖ Profils de charge et machine learning pour l'identification des noyaux de recul et de la correction du dépôt de charge (2026)
- ❖ Mesures primaires de la fluence neutronique (565 keV – 7 MeV) et distribution en énergie (2027-2028)
- ❖ Mesures de sections efficaces du ^1H , du ^4He , du ^{12}C et de l'air avec le dispositif DAMSEG (2027-2028)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION