



**HAL**  
open science

## Intelligence artificielle appliquée à l'accélérateur supraconducteur SPIRAL2

Charly Lassalle, Patrick Bonnay, Frédéric Bouly, Marco Di Giacomo, Adnan Ghribi, Quentin Tura

► **To cite this version:**

Charly Lassalle, Patrick Bonnay, Frédéric Bouly, Marco Di Giacomo, Adnan Ghribi, et al.. Intelligence artificielle appliquée à l'accélérateur supraconducteur SPIRAL2. Les journées accélérateurs 2023 de la SFP, Oct 2023, Roscoff, France. . hal-04927922

**HAL Id: hal-04927922**

**<https://hal.science/hal-04927922v1>**

Submitted on 4 Feb 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Intelligence artificielle appliquée à l'accélérateur supraconducteur SPIRAL2

C. LASSALLE<sup>3,4</sup>, P. BONNAY<sup>1</sup>, F. BOULY<sup>2</sup>, M. DI GIACOMO<sup>3</sup>, A. GHRIBI<sup>3</sup>, Q. TURA<sup>3</sup>

1 CEA IRIG/DSBT, Grenoble, France  
2 LPSC, Université Grenoble-Alpes, CNRS/IN2P3, Grenoble, France  
3 GANIL, Caen, France  
4 Université de Caen Normandie, Caen, France

## Résumé

Des études d'application de l'intelligence artificielle pour l'accélérateur linéaire supraconducteur SPIRAL2 sont menées au GANIL, en collaboration avec les laboratoires CEA/DSBT et IN2P3/LPSC. L'objectif est de fiabiliser le fonctionnement de l'accélérateur, et d'augmenter ainsi la disponibilité du faisceau. Tout d'abord, l'attention est portée sur les systèmes radiofréquence et cryogénique des cryomodules. Ceux-ci sont modélisés afin de générer des séries temporelles multivariées par simulation. Par la suite, ces ensembles de données seront utilisés par des algorithmes d'apprentissage automatique pour détecter et classer des anomalies dans les séries temporelles issues du système d'acquisition de l'accélérateur (EPICS). Des observateurs virtuels, basés sur des réseaux de neurones profonds, sont également étudiés afin de prédire la charge thermique perçue par le bain d'hélium. L'accomplissement final de ce projet serait l'intégration réussie au contrôle commande de l'accélérateur. Le poster décrit l'organisation mise en place et les premiers résultats obtenus.

## LINAC SPIRAL2

### Structures supraconductrices :

- cavités ;
  - quart-d'onde,
  - niobium massif,
- cryomodules ;
  - 12 type A,
    - ➔ 1 cavité  $\beta = 0.07$
  - 7 type B,
    - ➔ 2 cavités  $\beta = 0.12$
- cavités refroidies par hélium liquide (4,2 K).

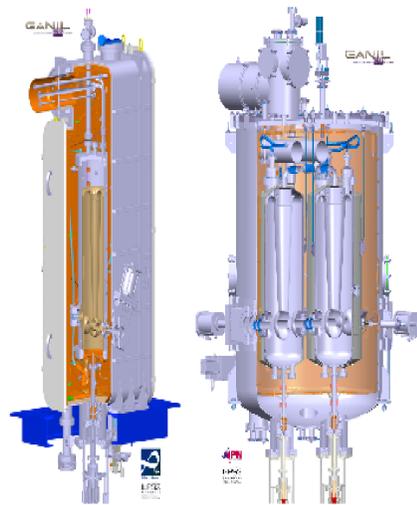


FIGURE 1 – Structure des cryomodules (à gauche : type A, à droite : type B)

### Régulations :

- tension et phase accélératrices ;
- fréquence de résonance ;
- pression et niveau du bain d'hélium liquide[1].

### Modélisations sous Matlab/Simulink :

- cryogénie [1, 2] ;
- radiofréquence [3] ;

## Classification d'anomalies

### Objectif : Etablir un diagnostic automatique des défauts enregistrés par le LLRF.

- aide indirecte à la fiabilisation de l'accélérateur ;
- apprentissage supervisé ;
- séries temporelles.

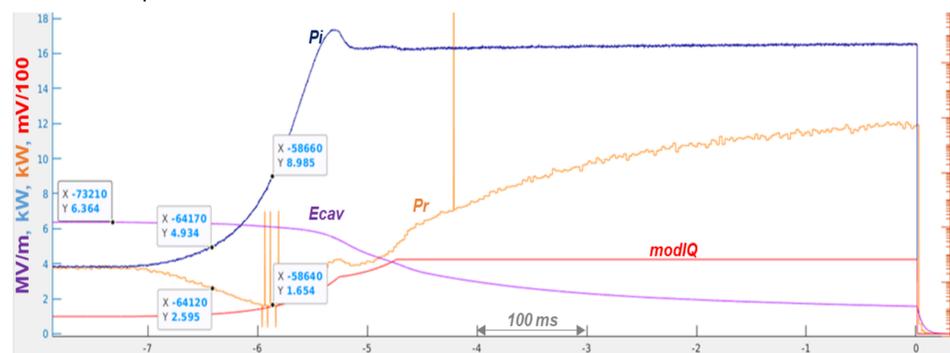


FIGURE 2 – Enregistrement d'un défaut par le buffer circulaire du LLRF

## Perspectives

- modéliser les interactions entre les systèmes cryogénique et radiofréquence ;
- étudier les dissipations provenant du coupleur ;
- calibrer la modélisation du système cryogénique ;
- générer des données par simulation ;
- comparer différentes architectures de réseaux de neurones ;
- étudier la robustesse ;
- comparer les performances face à d'autres observateurs développés (ex : filtre de Kalman étendu [1]).

## Observateur de charge thermique

**Objectif :** Estimer correctement la charge thermique reçue par le bain d'hélium liquide.

### Premières observations :

- entraînement de perceptrons multicouches sur des montées et descentes de charge thermique ;
- nécessité d'apprendre sur un dataset représentant la variété des données ; 2 cavités
- résultats prometteurs avec des LSTM (à reproduire).

### Données :

- mesures d'études machine (2022 et 2023) ;
- simulations avec modélisation du système cryogénique.

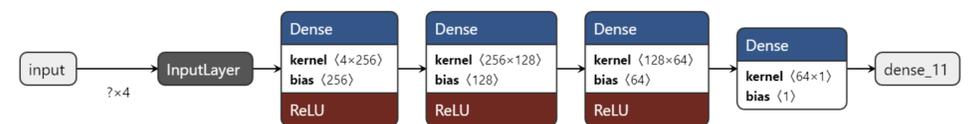


FIGURE 3 – Structure du perceptron multicouche utilisé

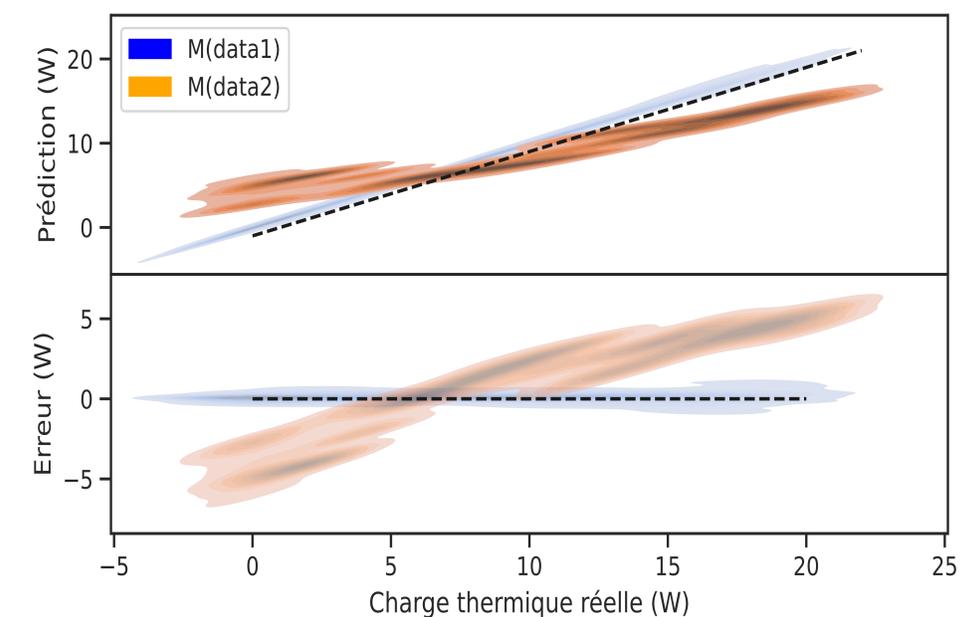


FIGURE 4 – Prédiction de montées de charge thermique avec un perceptron multicouche : M est le modèle entraîné (montée+descente par paliers de 1W) ; M(data1) représente l'estimation de densité des prédictions effectuées sur son ensemble de validation ; M(data2) représente l'estimation de densité des prédictions effectuées sur une montée de charge thermique par paliers de 2W ; l'erreur est définie ici comme la différence entre la valeur réelle et la prédiction.

## Références

- [1] Adrien VASSAL. « Etude d'un réseau cryogénique multi-clients pour SPIRAL2 ». 2019NORMC223. Thèse de doct. 2019. URL : <http://www.theses.fr/2019NORMC223/document>.
- [2] F. BONNE et al. « Simcryogenics : a Library to Simulate and Optimize Cryoplant and Cryodistribution Dynamics ». In : IOP Conference Series : Materials Science and Engineering 755.1 (mars 2020), p. 012076. DOI : 10.1088/1757-899X/755/1/012076. URL : <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/755/1/012076>.
- [3] Frédéric BOULY et al. « Superconducting cavity and RF control loop model for the SPIRAL2 Linac ». In : LINAC2022 - 31st Linear Accelerator Conference. T. LINAC2022. Liverpool, United Kingdom, août 2022, THPOPA13. DOI : 10.18429/JACOw-LINAC2022-THPOPA13. URL : <https://hal.science/hal-03839868>.