

# Prospectives et intérêts pour l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle

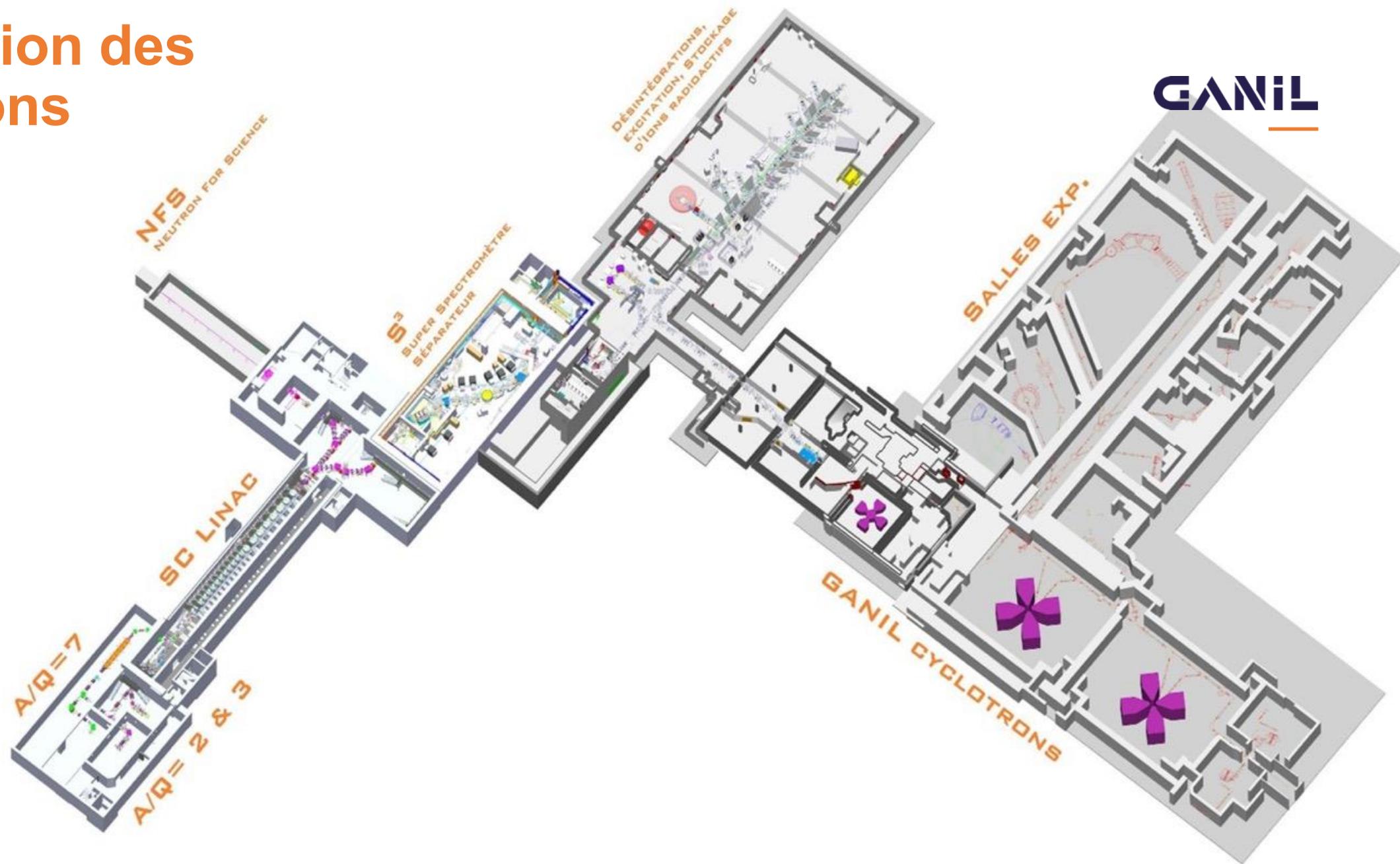
À la Division Opération et Développement

- Diagnostic virtuel pour la cryogénie et au-delà
- Maintenance prédictive pour les compresseurs
- Optimisation de l'opération pour CIME
- Classification rapide des défauts LLRF
- Un assistant virtuel pour l'opération
- Un jumeau numérique pour le contrôle commande
- Un jumeau numérique pour le diagnostic avancé
- Analyse avancée automatique des données de production d'isotopes radioactifs

# Présentation des installations



# Présentation des installations



# Diagnostic virtuel pour la cryogénie et au delà

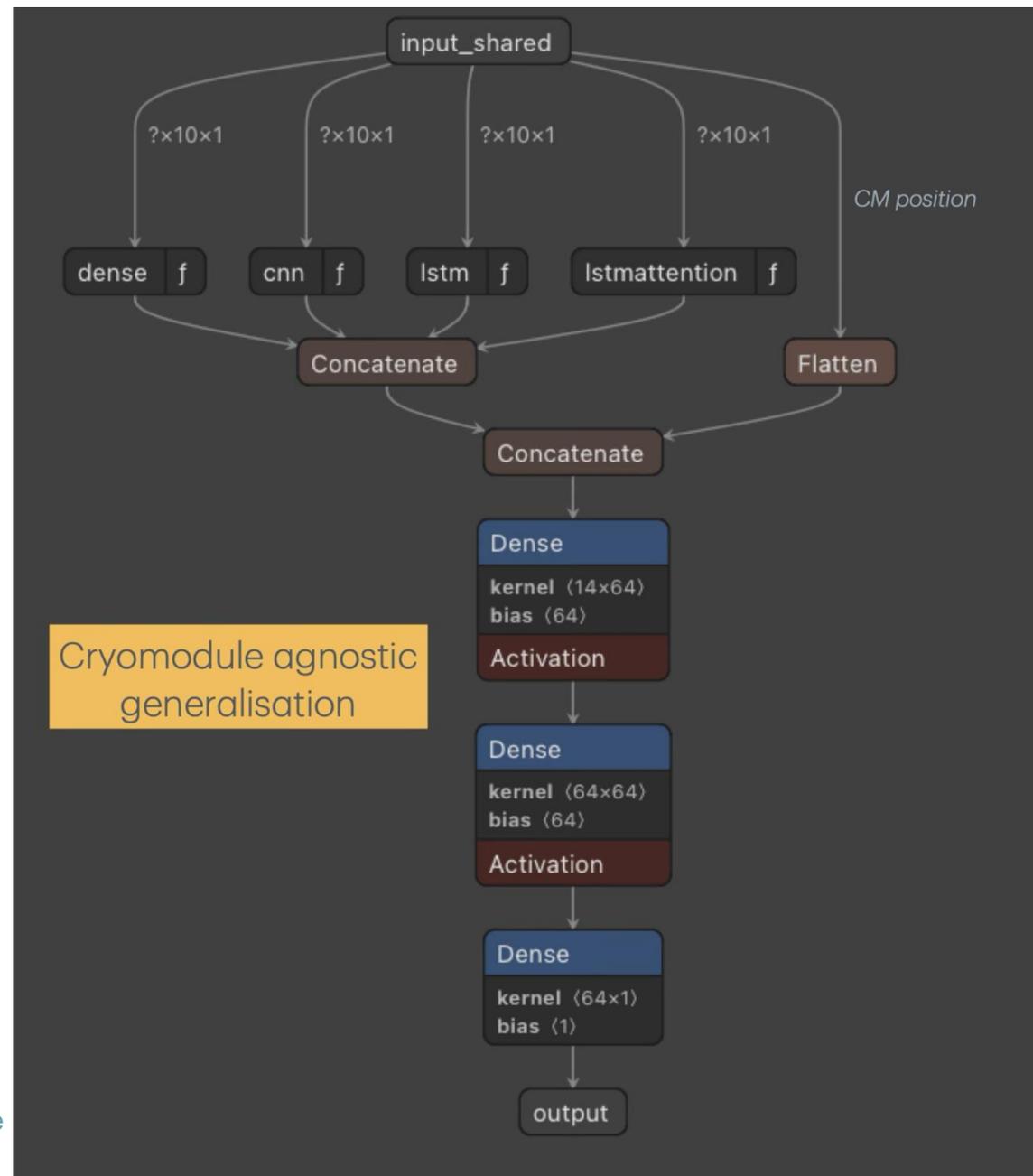
✓ Génération d'observateurs de charge thermique continus précis en opération pour les cavités supraconductrices SPIRAL 2 :

- Temps de mesure  
~ 1h hors opération → ~ 1 s en opération
- Précision de mesure  
 $\pm 1$  Watt @ 4 Kelvin →  $\pm 0,1$  Watt @ 4 Kelvin

□ Reste à faire :

- Généralisation multi-physique (ex. facteur de qualité)
- Intégration pressions piezo-électriques
- Intégration contrôle commande

Une des architectures utilisées pour l'observateur de charge thermiques des cavités SPIRAL2. Credit : Charly Lassalle



# Maintenance prédictive pour les compresseurs

## Etat

- Plusieurs **machines tournantes** (ex. compresseurs) sont nécessaires à l'opération des infrastructures.

## Problématique

- Les **défauts** et le temps de **maintenance** peuvent impacter de manière significative le temps faisceau.

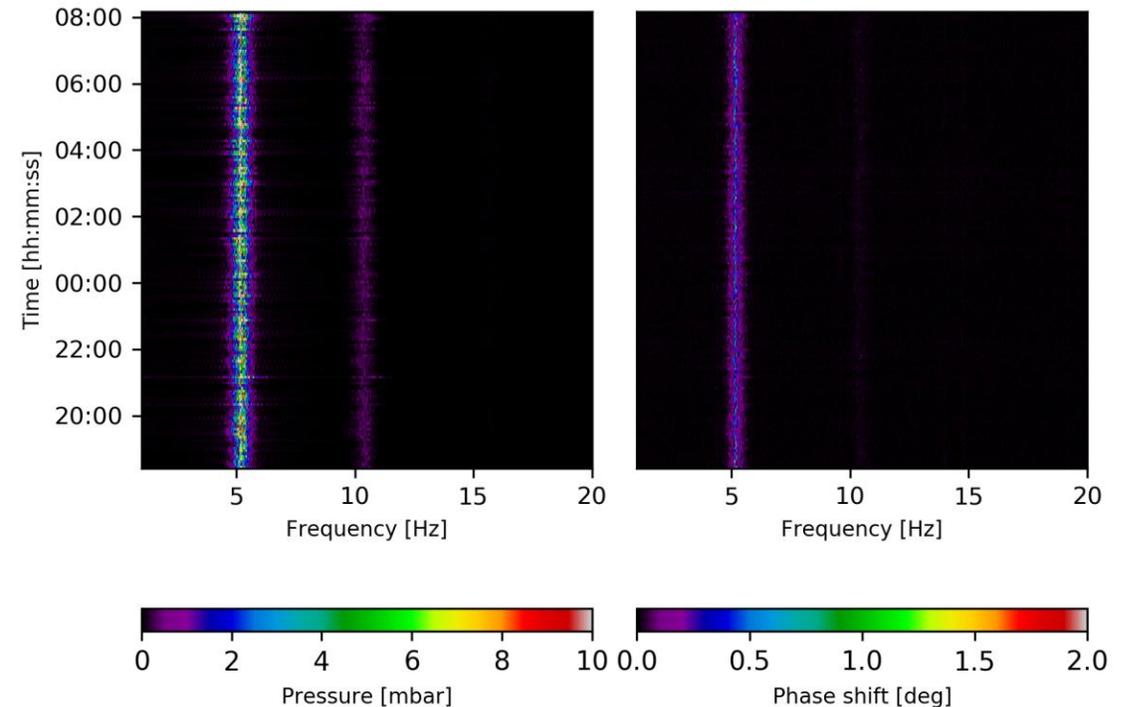
## Approche

- Exploiter les **fréquences et les amplitudes de vibrations** des machines tournantes pour inférer leur état de santé, effectuer leur maintenance prédictive et éviter les temps d'arrêt prolongés.

## Freins

- La mise en place de l'**acquisition** nécessaire, la **préparation des données** et l'**entraînement** sont nécessaires pour démontrer l'utilité dans le cadre de la maintenance prédictive.

CMA04 fast acquisition | TAO correction OFF | 2018-11-24



Spectres d'oscillations thermoacoustiques dans le LINAC SPIRAL2

# Optimisation de l'opération pour CIME

## Défis et problématiques

- **Réglage** des faisceaux stables **long** plus que 24 h
- **Optimisation** des faisceaux radioactifs **difficile**
- **Transmission** nominale de CIME difficile à atteindre

## Approches à explorer

- **Jumeaux numériques** (physique) intégrés au contrôle/commande (PINN, surrogates)
- **Optimisation** prenant en compte les dérives machines et les incertitudes de mesure (BO; RL)

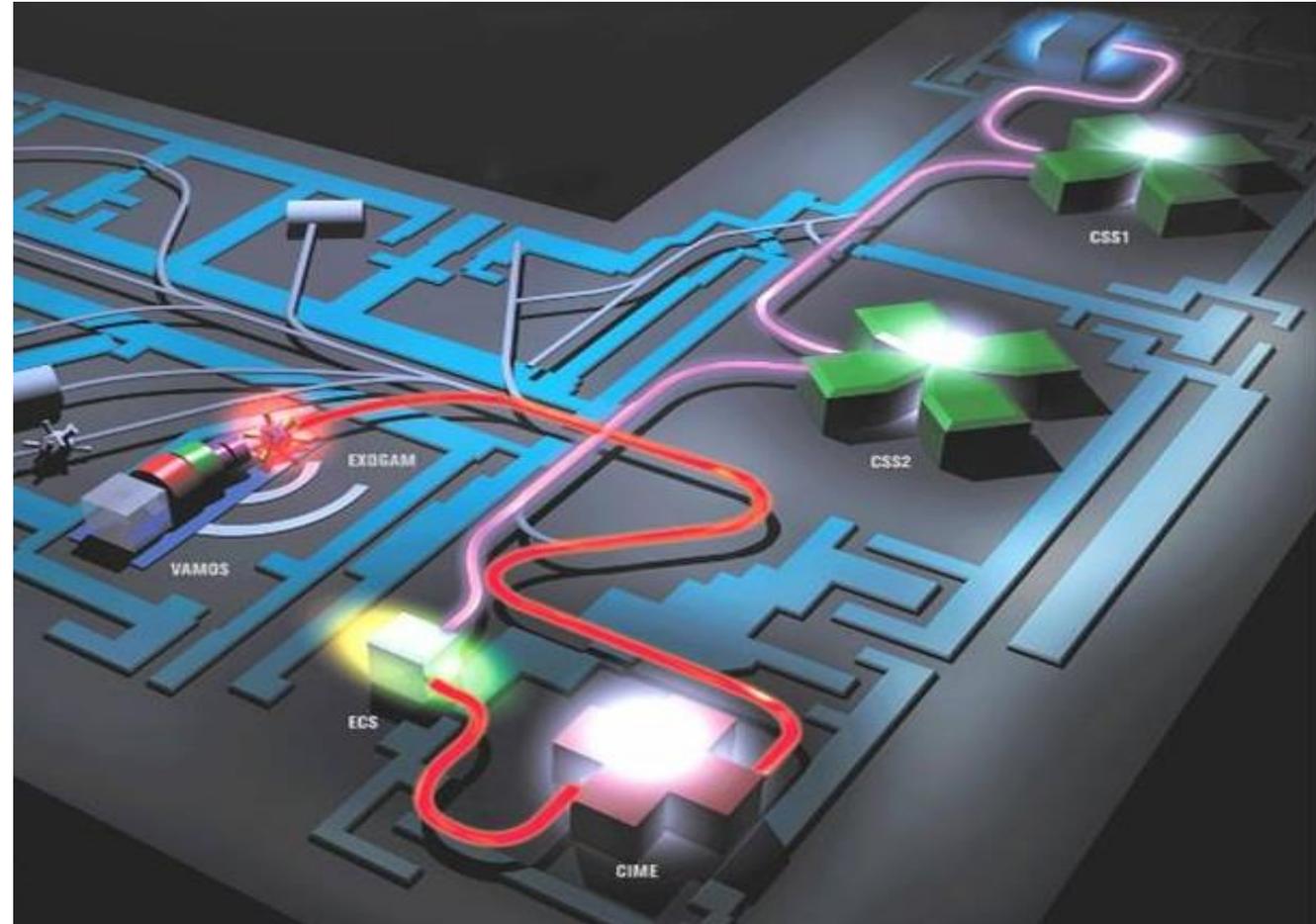


Schéma de fonctionnement CSS1, CSS2, CIME avec EXOGAM et VAMOS. Credit : Omar Kamalou



# Un assistant virtuel pour l'opération

**Etat actuel** : L'opération s'appuie sur :

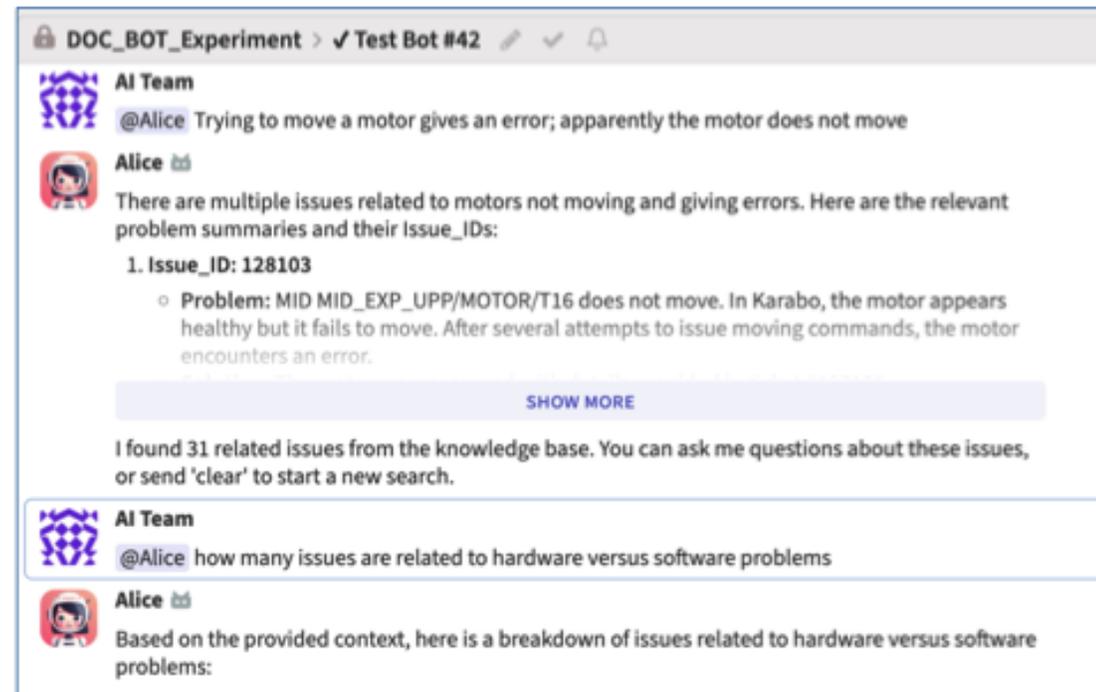
- La sauvegarde des **paramètres de réglage**
- La sauvegarde des **process values** (données opération)
- Les entrées des **log-book** (opérateurs/ingénieurs)

## Problématique

Les informations contenues dans les log-book sont largement sous-utilisées et pas toujours faciles à trouver.

## Objectif/Approche

Utiliser les **log-books** pour l'**entraînement / fine tuning** d'un LLM et générer un chat-bot hors ligne d'assistance à l'opération.



Interaction with bot Alice (linked to a state-of-the-art commercial LLM) via the Zulip chat tool. Credit L. Brodersen (EXFEL)

# Un jumeau numérique pour le contrôle commande

**Etat actuel** : Le contrôle/commande s'appuie sur :

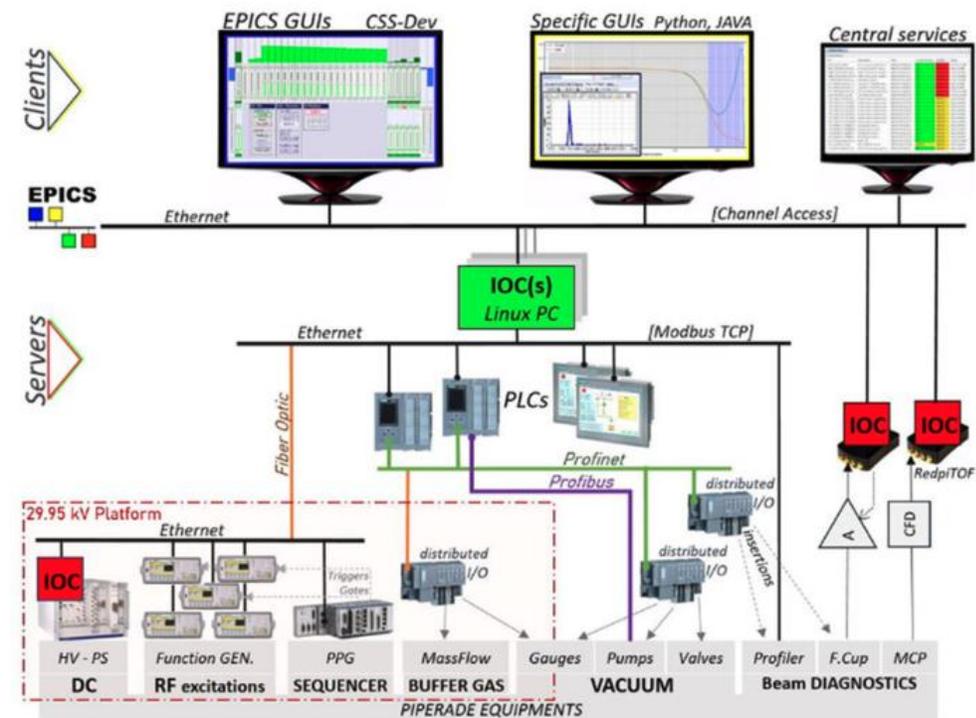
- Plusieurs équipements / VME / IOC (Input/Output Controllers)

## Problématique

Mener des **campagnes de validation** « hors production » pour ensuite mettre en production des logiciels mieux testés

## Objectif/Approche

Utiliser des **jumeaux numériques** comme banc de prototypage typiquement une IHM dont l'interface pourrait être mise au point avec l'utilisateur sur une machine simulée.



Exemple d'architecture de commande/contrôle pour PIPERADE. Credit : Laurent Daudin (CONTROL SYSTEM AND SPECIFIC INSTRUMENTATION DEVELOPMENTS FOR SPIRAL2-DESIR SETUPS)

# Un jumeau numérique pour le diagnostic avancé

## Etat actuel (en cours)

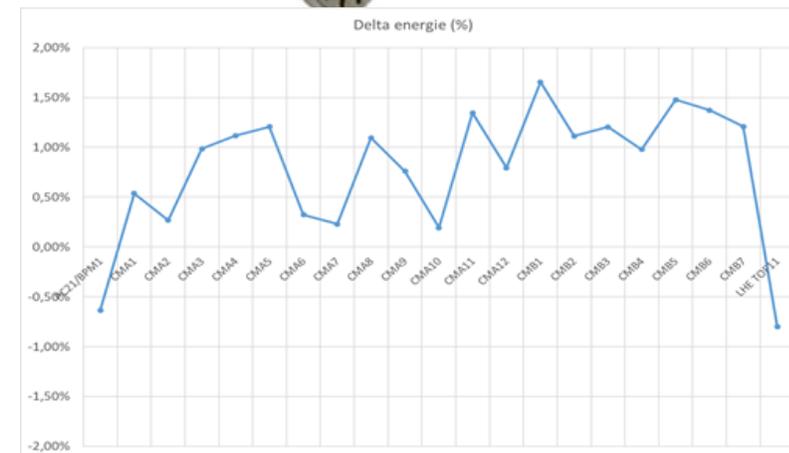
- Phases faisceaux théoriques des diagnostics  
BPM (Beam Position Monitor) et des sondes TOF disponibles via les simulations (TraceWin)
- Contrôle des phases et des énergies du faisceau sur les 20 diagnostics BPM et les sondes TOF. Comparaison en continu des énergies mesurées et théoriques du faisceau sur chaque cavité

## Problématique

- La gestion des phases des cavités RF nécessite la fourniture des phases théoriques à appliquer sur les cavités RF.
- Les réglages cavités actuels reposent sur des réglages de faisceaux de référence et limitent la modélisation complète des phases de l'accélérateur.

## Objectif/Approche

- Produire et intégrer un **jumeau numérique** capable de prédire les phases théoriques à appliquer sur les cavités RF et de connaître les phases faisceau théoriques des diagnostics BPM et TOF associés
- Analyse en temps réel des drifts des prédictions vs diagnostics



Détail des analyseurs de profil de faisceau (BPM). Credit : Christophe Jamet. Voir aussi : PHASE SETTING ISSUES FOR THE SPIRAL2 LINAC, LINAC2024

# Analyse avancée automatique des données de production d'isotopes radioactifs

## Etat actuel (en cours)

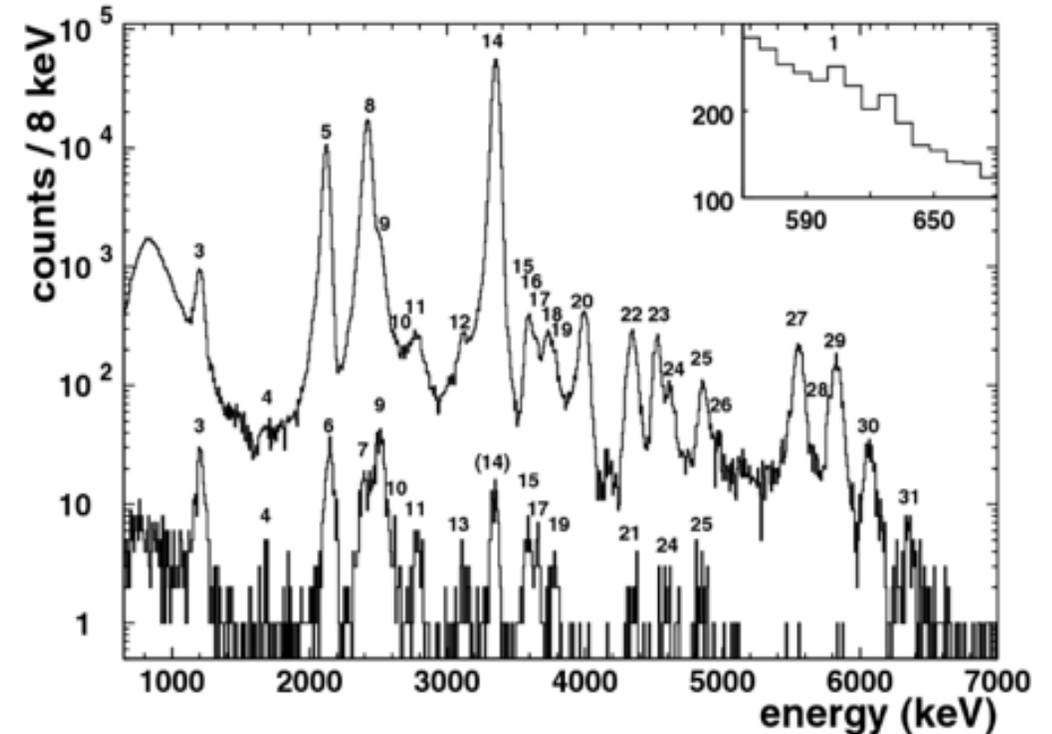
- Analyse « **à la main** » d'un physicien/ingénieur, qui peut être très longue (**plusieurs semaines**) pour des cas compliqués.

## Problématique

- Analyse souvent **complexe** à cause de la multiplicité des paramètres pouvant affecter la production et la relâche d'isotope, la mesure de décroissance radioactive et l'interprétation des résultats.

## Objectif/Approche

- **Automatisation de l'analyse** offline + temps-réel  
automatisation de la mise en forme des données, de la calibration, de l'attribution des pics, de l'extrapolation de taux de production dans des conditions de mesure non idéales,...



Exemple de décroissance beta à SPIRAL2. Credit : Pierre Chauveau

# Conclusion

Les méthodes d'intelligence artificielle peuvent grandement **améliorer l'opération** d'infrastructures telles que le GANIL et permettre de :

- Améliorer la qualité des faisceaux et donc les retombées scientifiques
- Augmenter le temps faisceau et donc le temps alloué aux expériences
- Diminuer le coût énergétique des installations

Cependant, les développements nécessitent un travail en **étroite collaboration** avec les experts en science des données et théorie de l'information.

**La présence du GREYC sur le campus est en cela un atout pour l'avenir.**

**GANiL**

**Merci pour votre attention**

**GANiL**

**Backup**

# Maintenance prédictive pour les compresseurs

## Etat

- Plusieurs **machines tournantes** (ex. compresseurs) sont nécessaires à l'opération des infrastructures.

## Problématique

- Les **défauts** et le temps de **maintenance** peuvent impacter de manière significative le temps faisceau.

## Approche

- Exploiter les **fréquences et les amplitudes de vibrations** des machines tournantes pour inférer leur état de santé, effectuer leur maintenance prédictive et éviter les temps d'arrêt prolongés.

## Freins

- La mise en place de l'**acquisition** nécessaire, la **préparation des données** et l'**entraînement** sont nécessaires pour démontrer l'utilité dans le cadre de la maintenance prédictive.

Vis pour compresseur à vis hélium



Utilité pour la cryogénie, le vide mais aussi pour la réfrigération.



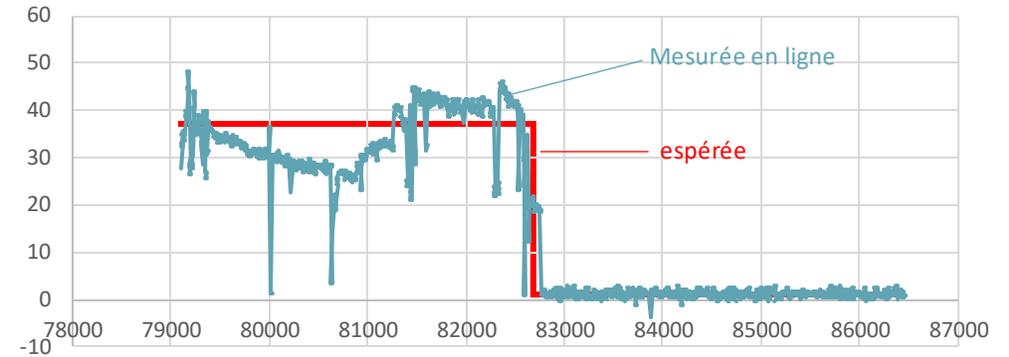
Pompe turbo-moléculaire

Etat : Analyse « à la main » d'un physicien/ingénieur, qui peut être très longue (plusieurs semaines) pour des cas compliqués.

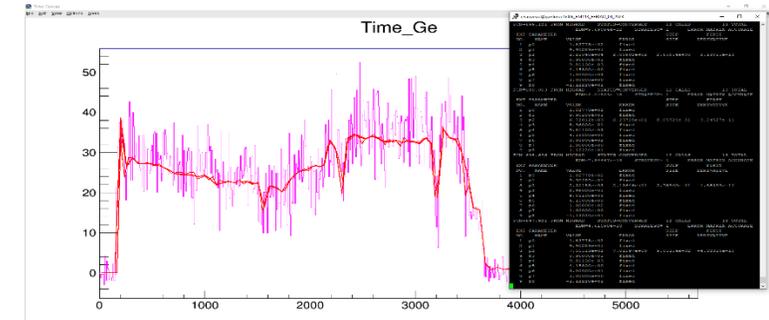
Problématique : Analyse souvent complexe à cause de la multiplicité des paramètres pouvant affecter la production et la relâche d'isotope, la mesure de décroissance radioactive et l'interprétation des résultats

Objectif : toute avancée permettant de faciliter l'analyse de donnée, voire de la réaliser en temps réel (automatisation de la mise en forme des données, de la calibration, de l'attribution des pics, de l'extrapolation de taux de production dans des conditions de mesure non idéales,...)

Intensité faisceau primaire au cours du temps



Intensité gamma d'un isotope de **courte durée de vie** au même moment



Intensité gamma d'un isotope de **long temps de relâche** au même moment

