

Journées Accélérateur 2021



ACCELERATORS AND
CRYOGENIC SYSTEMS



Irène Joliot-Curie

Laboratoire de Physique
des 2 Infinis

ACCELERATORS and CRYOGENIC SYSTEMS

Parc Orsay Université – 21 rue Jean Rostand
91893 Orsay Cedex

Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie
IJCLab - UMR9012 - Bât. 100 - 15 rue Georges Clémenceau
91405 Orsay cedex



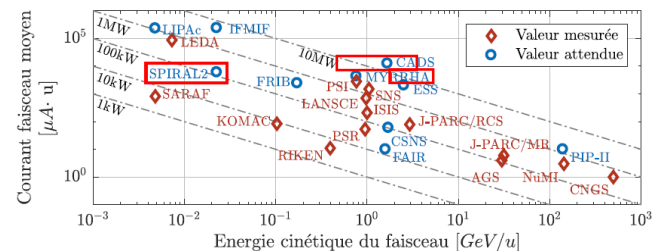
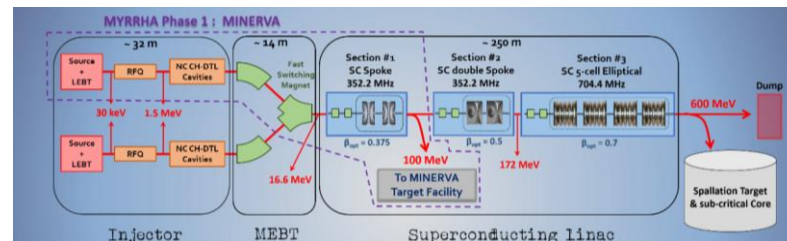
université
PARIS-SACLAY

Université
de Paris



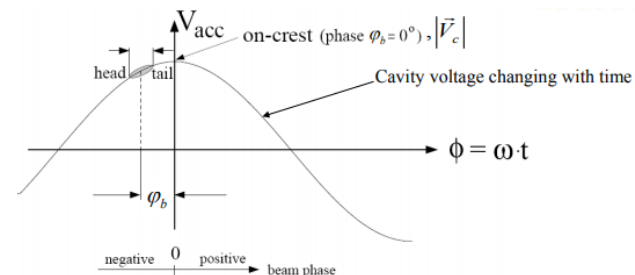
Le projet MYRRHA et les contraintes de l'accélérateur

- La transmutation est l'une des voies pour stabiliser les stocks d'actinides mineurs (AM) et des produits de fission à vie longue (PFVL) → réduction des surfaces de stockage en couche géologique
 - La transmutation de l'isotope d'un élément en un autre peut être provoquée en réacteur nucléaire
 - La Belgique s'est engagée à construire à horizon 2026 la Phase 1 (MINERVA)
 - Financement de l'ensemble de MYRRHA non encore assuré
- Criticité du réacteur pilotée par un accélérateur de particule → manière la plus sécurisée de contrôler un cœur à forte teneur en AM
 - Faisceau continu de protons de très forte puissance: 600 MeV (100 MeV MINERVA) et 4 mA
 - Flux intense de neutrons produits par spallation
 - Spectre neutrons rapides, refroidissement par eutectique Pb-Bi
 - Exigences de fiabilité jamais atteintes par des machines de recherche
- Spécificités des sous-systèmes cryogéniques et RF
 - Cavités supra dès 17 MeV de technologie Spoke → une première à ce niveau d'énergie
 - Très fortes puissances cryogéniques statiques et dynamiques (resp° 10 et 20 W @ 2 K par cryomodule)
 - Redondance nécessaire: parallèle (injecteur) et série (LINAC)
 - Refroidissement des cavité supraconductrices par de l'hélium superfluide à 2 K
- Exigences de stabilité du contrôle amplitude & phase du champ et des systèmes cryogéniques
 - Robustesse aux perturbations, amplifiées par les couplages physiques entre systèmes cryogéniques et RF
 - Robustesse pendant les phases de tuning / retuning (mode « Fault Tolerance »)
 - Non seulement en mode CW mais aussi pulsé (commissioning, démarrage ...)



Charges thermiques équivalentes à 4.5 K

Spiral 2	1300 W
MINERVA 100 MeV	3970 W
ESS	9300 W



- Les systèmes de régulations cryogéniques et RF proche cavité

- LLRF (low level RF) pour l'amplitude et la phase du champ
- SAF (système d'accord à froid) fréquence de résonance cavité
- Cryogénie: pression et niveau bain hélium cavité

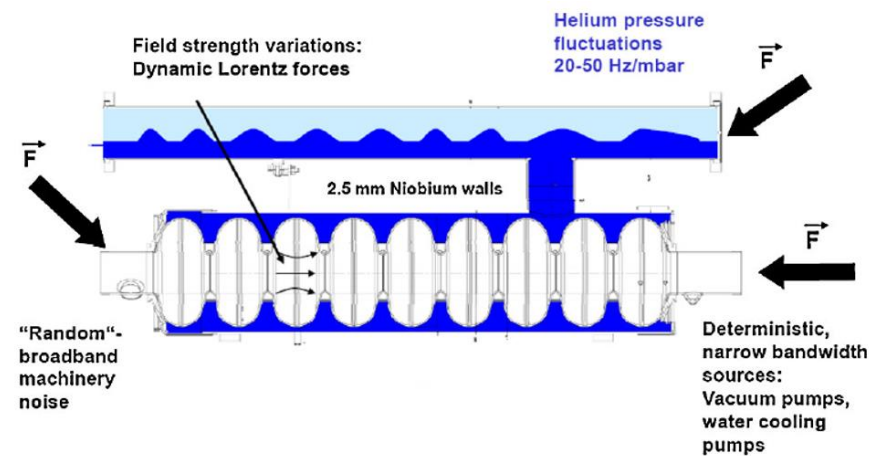
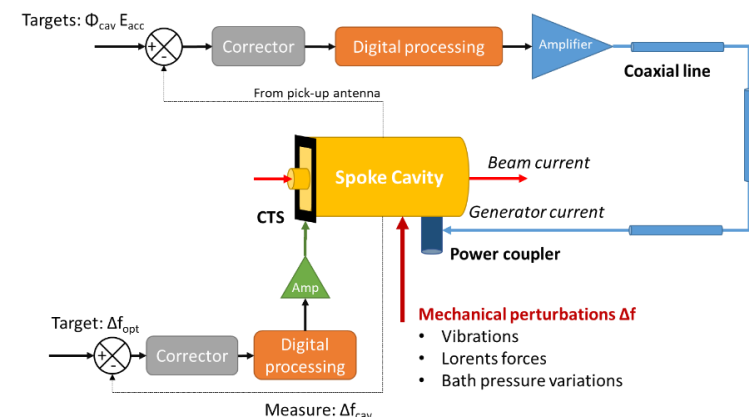
→ **Couplages multiples: forces électromagnétiques, mécanique et thermique**

→ **Ces régulations doivent être stables dans toutes les conditions de fonctionnement**

- **Pierre angulaire:** disposer d'un outils de simulation système « dynamique », intégrant les couplages RF et cryogéniques

- Intérêts d'un « jumeau numérique »

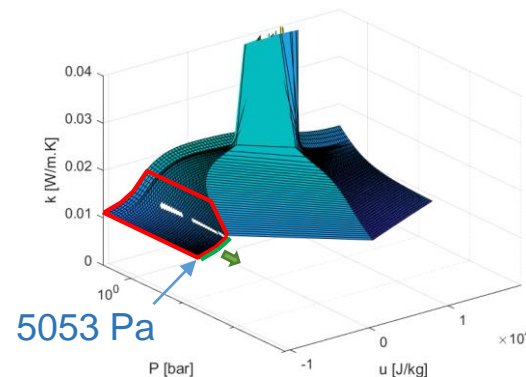
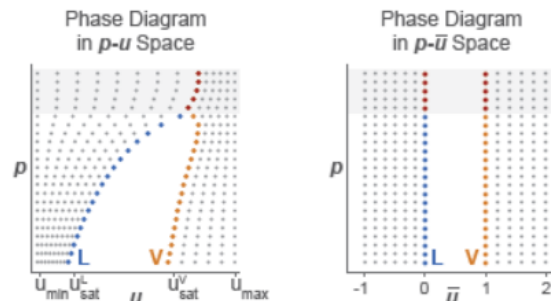
- Débogage pendant les tests **du prototype** du CM MINERVA
 - Diagnostic instrumentation
 - Mise au point régulations
- Projection performances et investigations diverses en **version « série »**
 - Quantifier pertes statiques / dynamiques, temps de MEF (mise en froid) ...
 - Etude scénarii contrôle cryogénique et RF en « Fault tolerance »
 - Etudes de scénarii commissioning
 - Simulation process pour commissioning de PLC (automates)
- En **phase d'opération**
 - Entrainement intelligence artificielle, maintenance préventive (suivi dérive) ...





Jalons franchis année 1

- **Besoin: un outil de simulation « dynamique »**
 - Pour résoudre des équations différentielles et algébriques
 - A un niveau de détail **modeste** mais **bien choisi** (0D, 1D)
 - Cibler autant les transitoires que les phases stabilisées
- **Appropriation de l'environnement existant Simscape multiphysique**
 - Simscape = « boîte à outils » de l'environnement Simulink
 - Langage graphique: un bloc = un ensemble d'équations
 - Domaine thermique et diphasique existant mais incomplet
- **Compléter l'environnement Simscape pour la cryogénie**
 - Intégration propriétés fluides sur 1 – 300 K: He, N₂
 - Intégration propriétés matières sur 1 – 300 K: Ni, Cu, acier 304L, Ti, G11 ...
 - Accent mis sur la variation forte des propriétés avec la température
- **Mise en équations et implémentation en blocs élémentaires**
 - Equations de conservation de masse, énergie et quantité de mouvement
 - **Création d'une bibliothèque de blocs**

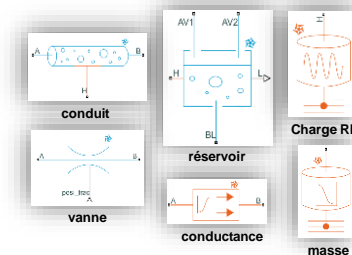


Energy conservation

$$M_L \frac{du_L}{dt} + \frac{dM_L}{dt} u_L = \phi_{L,In} - \phi_{L,Out} + \phi_{Con} - \phi_{Vap} + Q_L$$
$$M_V \frac{du_V}{dt} + \frac{dM_V}{dt} u_V = \phi_{V,In} - \phi_{V,Out} - \phi_{Con} + \phi_{Vap} + Q_V$$

Mass conservation

$$\frac{dM_L}{dt} = \dot{m}_{L,In} - \dot{m}_{L,Out} + \dot{m}_{Con} - \dot{m}_{Vap}$$
$$\frac{dM_V}{dt} = \dot{m}_{V,In} - \dot{m}_{V,Out} - \dot{m}_{Con} + \dot{m}_{Vap}$$





Jalons franchis année 1

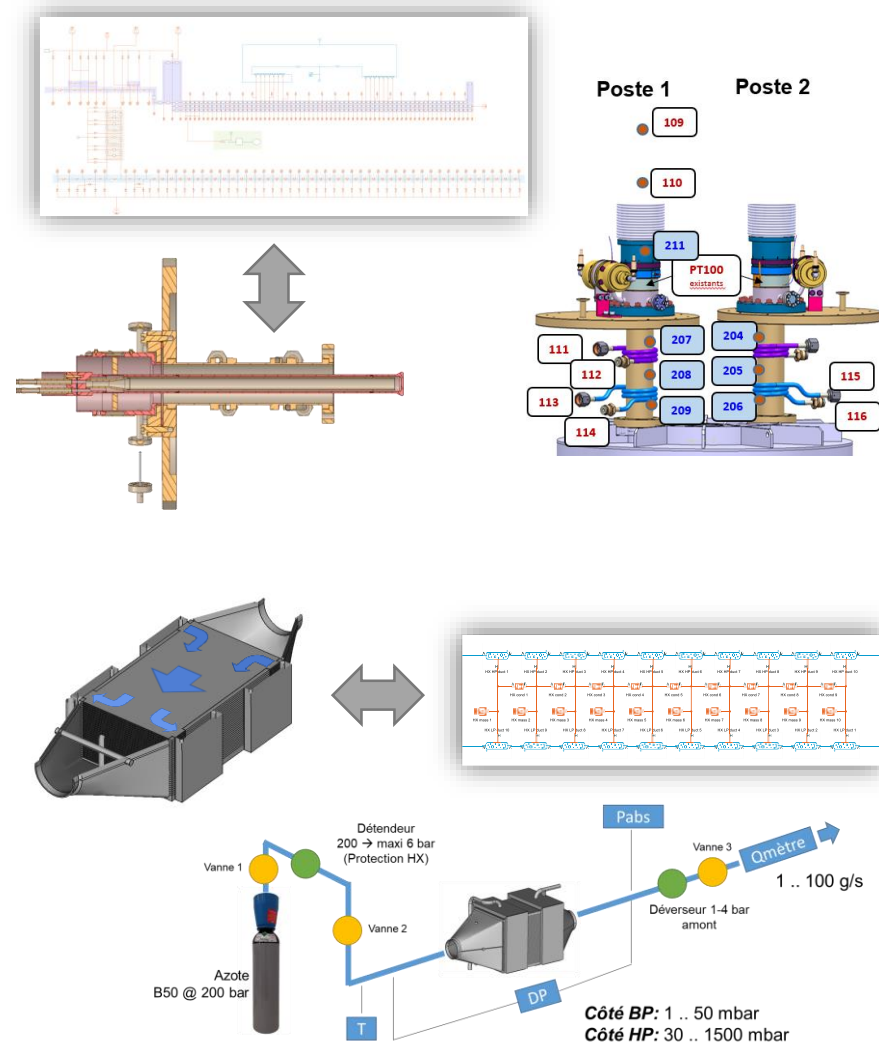
- **Modélisation de composants intégrant des processus RF et cryogéniques**

- Coupleur de puissance, cavité, vanne, échangeur, réservoir ...
- Identification des équations à résoudre
 - Simplification & hypothèses
 - Création de blocs élémentaires physiques
 - Assemblage des blocs en composants

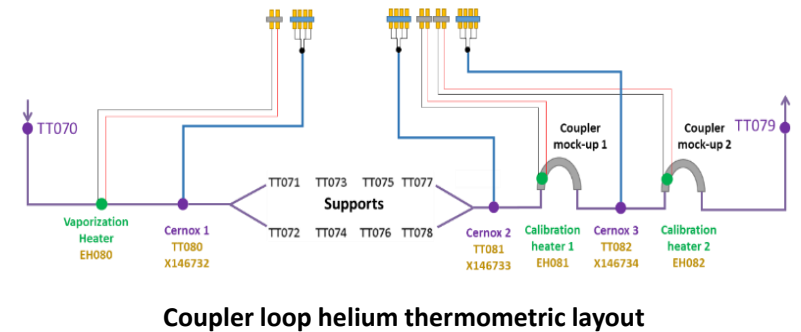
- **Paramétrage des composants sur cryomodule proto & boîte à vanne de test MINERVA**

- Recherche des données **géométriques, fonctionnelles** (simu, essais ..) des composants « tels que construits »
- **Tests complémentaires de certains composants**

→ *Il faut connaître précisément ce qui a été construit (pas seulement ce qui a été conçu)*

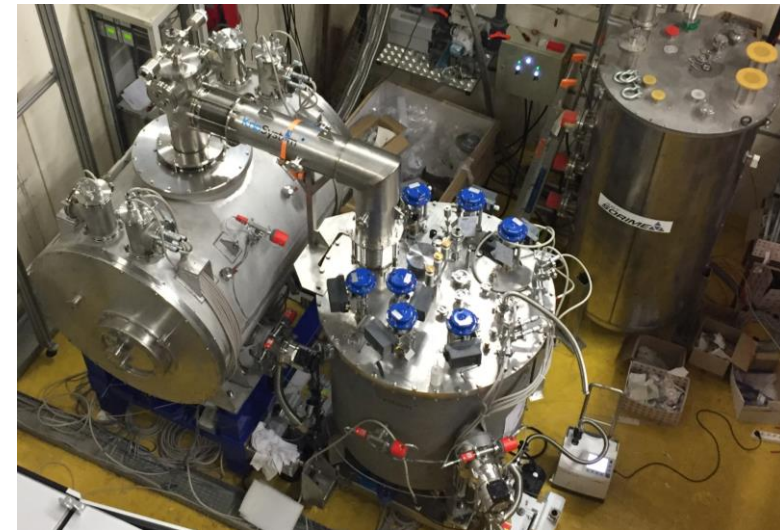


- Préparation tests système complet du cryomodule prototype MINERVA
 - Instrumentation & protocoles d'essais complémentaires
 - Retour d'expérience d'autres laboratoires
 - Les tests: statut et attendus
 - Mise en froid écrans réalisée, mise en froid de la masse froide à venir
 - **T1 2022**: validation performances RF et cryo en stationnaire: Q0, conso cryofluides, stabilité régulations
 - **T3 2022**: validation stratégies detuning/retuning rapide en mode « Fault tolerance »
- Créer un « ancrage » du modèle sur les tests réels puis raisonner en « écart »



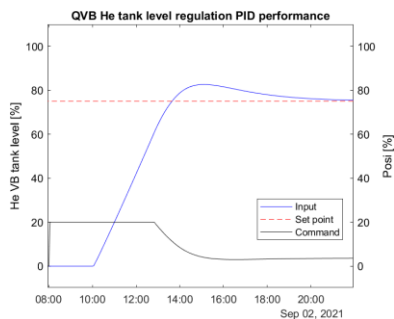
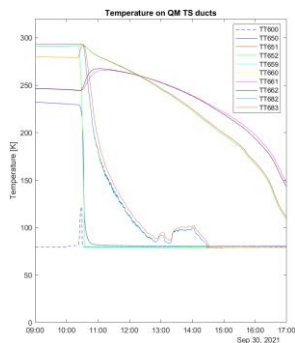
Cryomodule

Réchauffeur



Boite à vannes

- Simulations du système complet en appui aux essais
 - Diagnostic des acquisitions: cohérence capteurs, bilan puissance ...
 - Aide à la mise au point des régulations cryo
 - Aide à la préparation des manip longue durée (contrainte infra)



- Récupération et mise à jour modélisation Simulink cavité + système de contrôle en fréquence
 - Travaux LPSC sur MYRTE mis à jour avec les dernières mesures cavités MINERVA en cryostat vertical

→ Capacité de projection pour la série

→ Optimisation de la distribution cryo et des systèmes de contrôle

