



SPEKTRE,
**Une Plateforme de recherche sur les
plasmas magnétisés**

Frédéric BROCHARD

frederic.brochard@univ-lorraine.fr





Vous avez dit SPEKTRE?



SPEKTRE

Sheaths, Plasma Edge Kinetic Turbulence Radio-frequency Experiment



Recherche fondamentale et appliquée sur les plasmas magnétisés et la fusion nucléaire

Sommaire

1. Conception : du neuf avec du vieux

2. Plasmas faiblement magnétisés ($B \leq 0.1$ Tesla)

- Configuration
- Exemples d'études

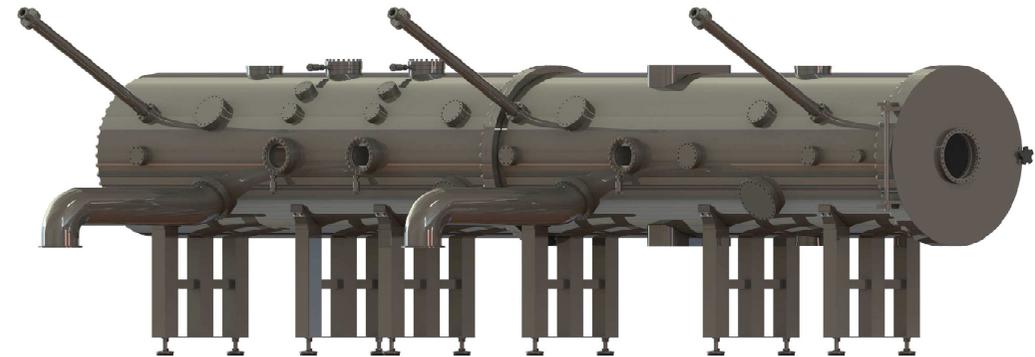
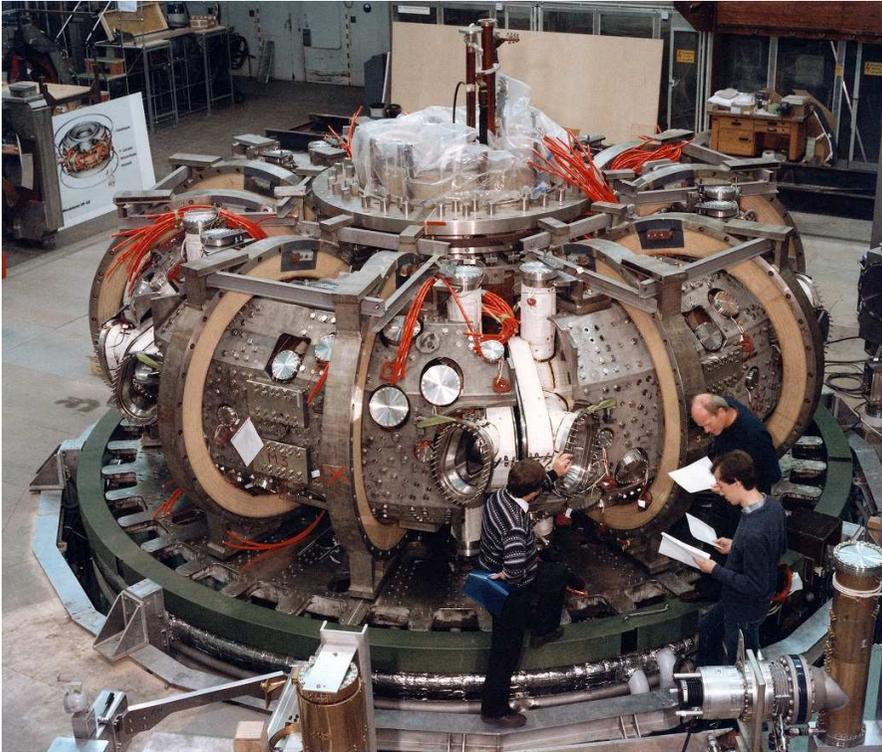
3. Plasmas chauds magnétisés ($B \leq 0.5$ Tesla)

- Configuration
- Exemples d'études

4. Calendrier prévisionnel

1. Conception : du neuf avec du vieux

SPEKTRE : un peu de récup' et de nouvelles idées



Wendelstein 7-AS (arrêté in 2002).
Ancien stellarator de l'Institut Max-Planck de
physique des plasmas (IPP Garching, Allemagne)

Convention de collaboration UL-IPP Garching pour
développer et exploiter SPEKTRE.

SPEKTRE : un peu de récup' et de nouvelles idées

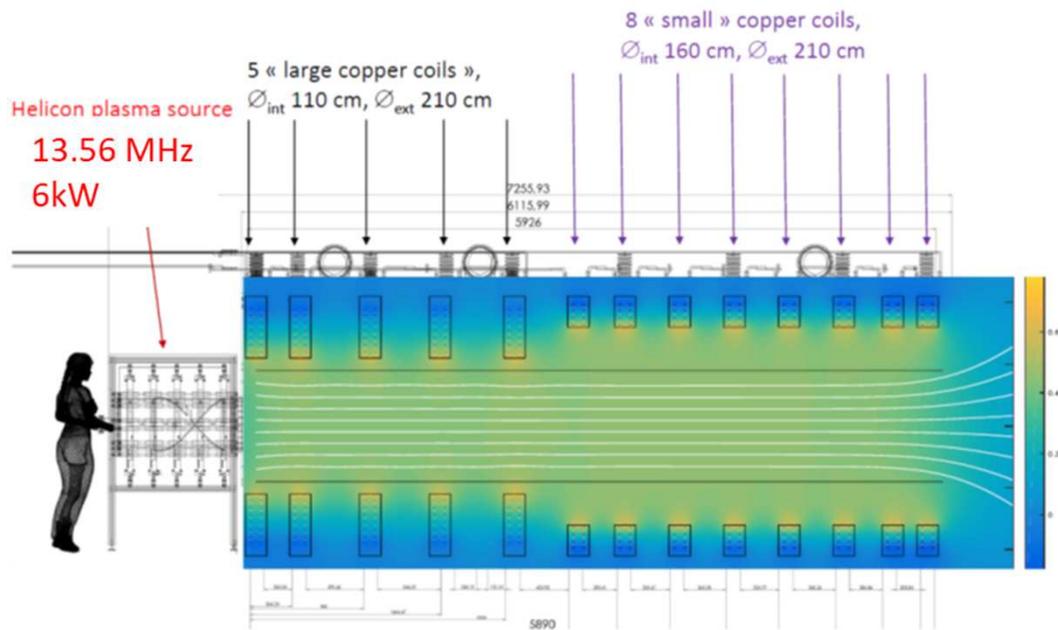
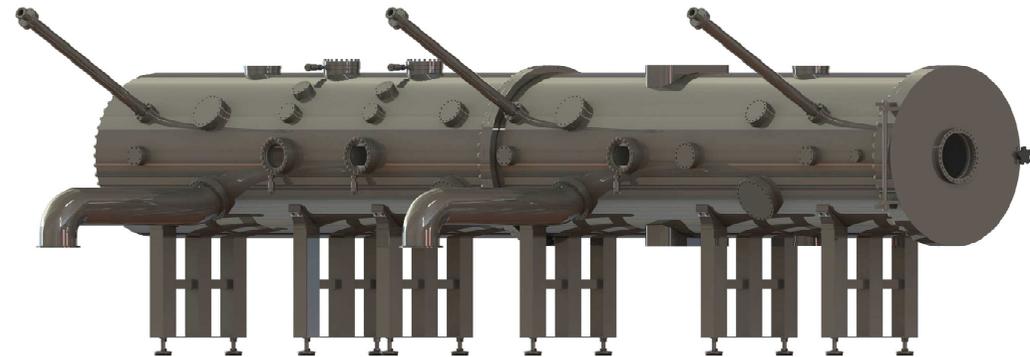
Contraintes diverses :

- Salle de 130 m² partagée avec une autre manip;
- 2 types de bobines (2 diamètres int. différents);
- Minimiser le ripple;
- Besoin d'espace entre les bobines pour les systèmes auxiliaires et les diagnostics.

Choix d'une configuration avec les 13 bobines alignées sur 6 mètres. Champ magnétique homogène sur un diamètre 56 cm, supérieur au diamètre du plasma en sortie de la chambre source hélicon.

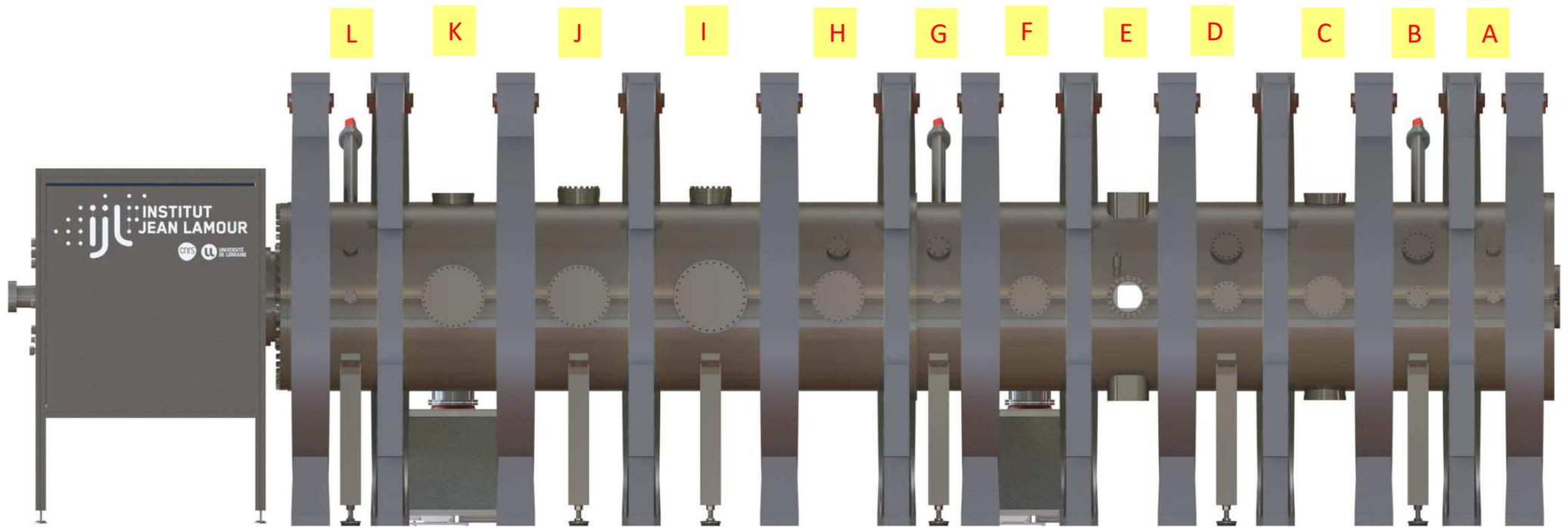
Diamètre intérieur mini des bobines : 110 cm

➡ Enceinte de 90 cm de diamètre et 597 cm de long, en 2 tronçons (acier AISI 316L)



96% B-field homogeneity in a cylinder of length 5.06 m & diameter 56 cm

Conception et possibilités de diagnostics

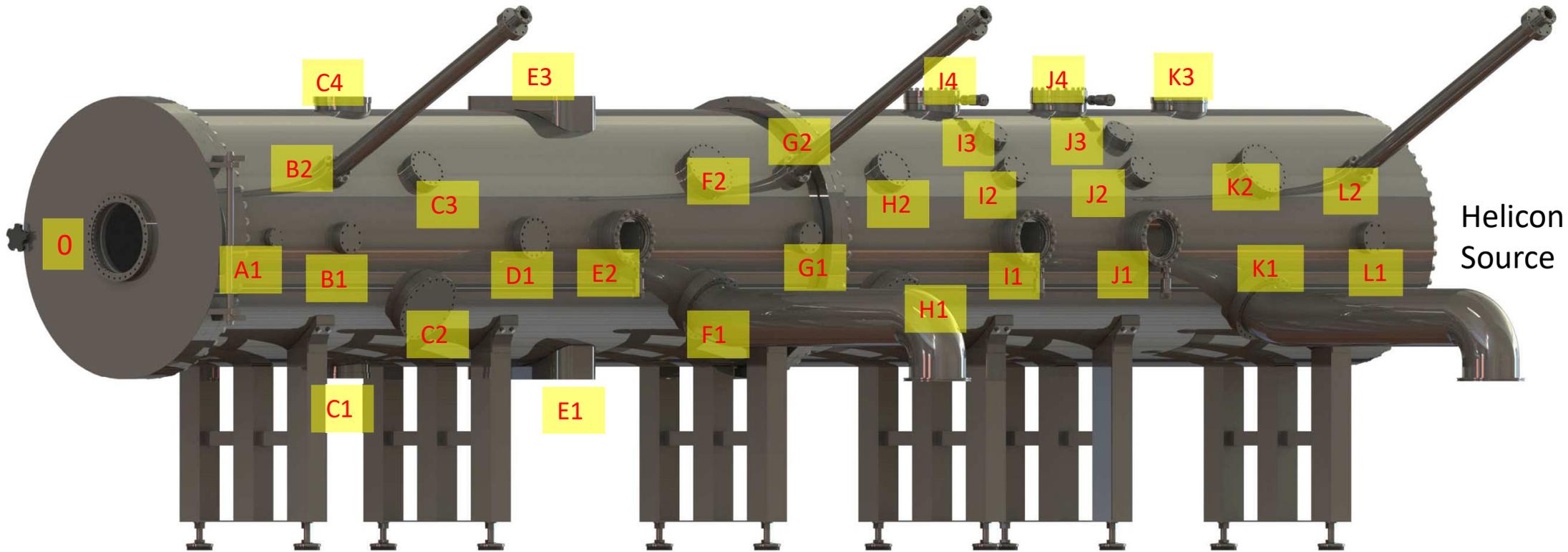


50 piquages dont >40 pour diagnostiquer

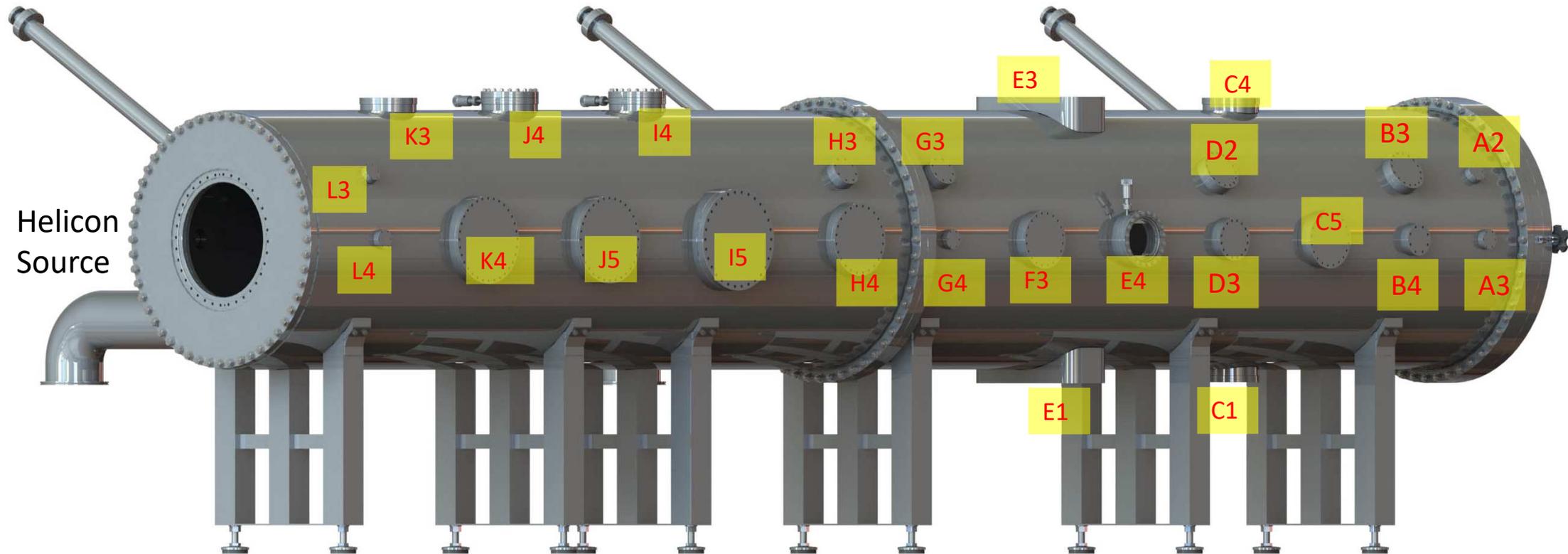
Diagnostics disponibles : 4 caméras rapides (vis), caméra IR, Spectros UV/vis, interféromètre, Spectro de masse, (TA)LIF, sondes en cours de conception, systèmes d'acquisition 128 voies 10 MHz

Diagnostics supplémentaires prévus : Sondes Mirnov & B-dots, sondes (fixes, réseaux, et mobiles – Langmuir, RFA, Mach, 5-tips, ball-pen), Réflectomètre, imagerie hyperspectrale et ultrasonique, et éventuellement à + long terme Diffusion Thomson

Conception et possibilités de diagnostics



Conception et possibilités de diagnostics



2. SPEKTRE et les plasmas froids magnétisés

- Conception

SPEKTRE et les plasmas froids magnétisés

Plasma créé par la source hélicon @13.56 MHz

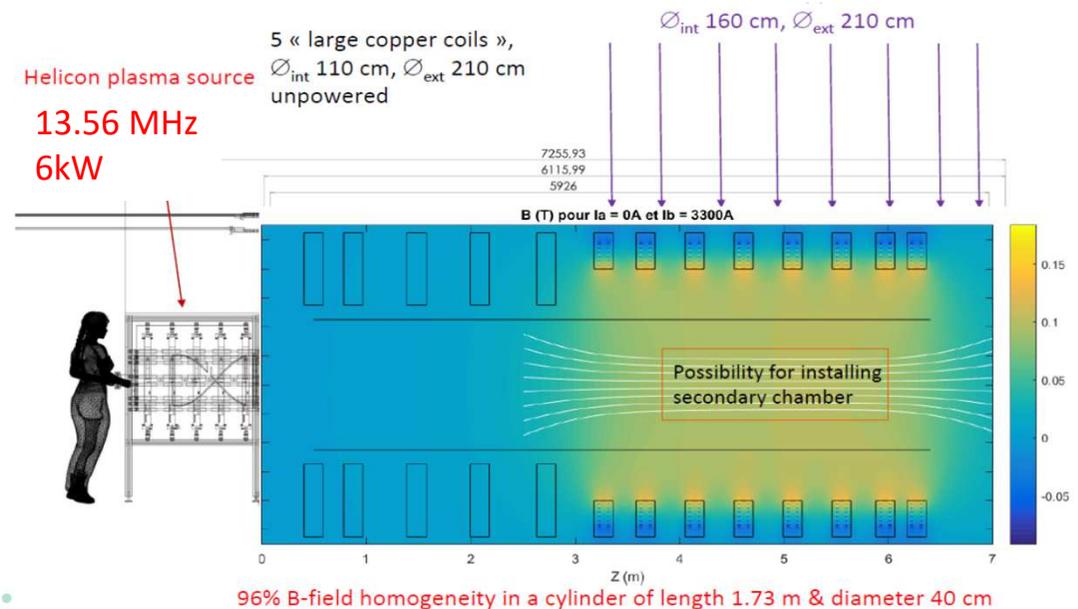
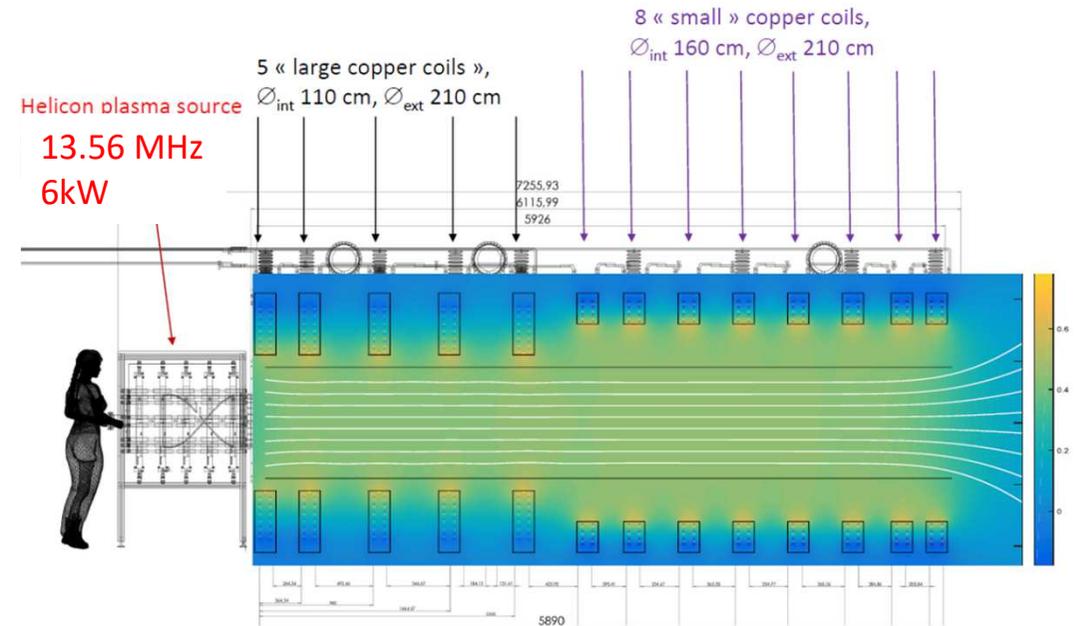
Performances à atteindre : électrons magnétisés
 $B \geq 50$ mT (500 Gauss), en stationnaire.
Si possible, 100 mT pour avoir des ions partiellement magnétisés.

Conception : 2 racks d'alimentations électriques (121 kVA total)

Refroidissement bobines et alim. anticipé, circuit eau dédié 180 kW thermiques.

➔ B stationnaire [0 – 100 mT]

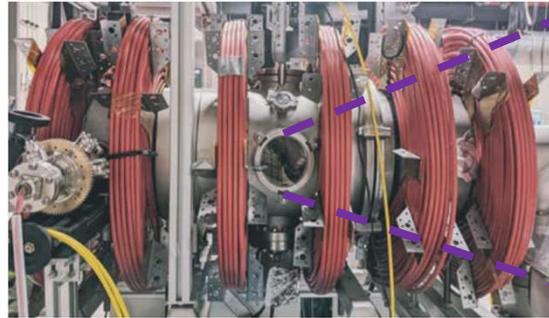
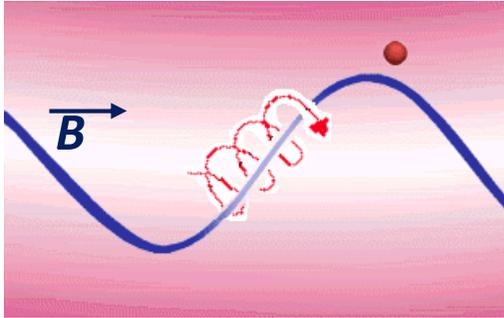
Possibilité de travailler avec l'enceinte principale, ou de l'utiliser comme caisson magnétique, et d'y insérer une enceinte secondaire avec sa propre source plasma (par ex: travail avec gaz corrosifs).



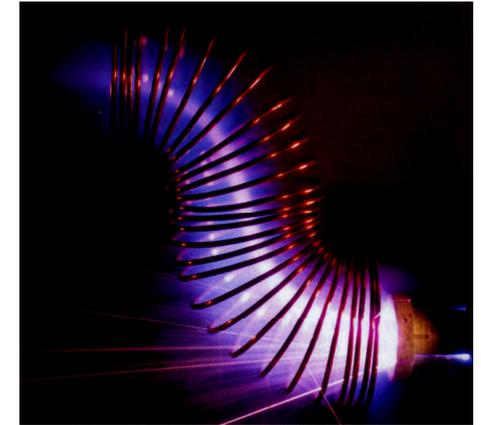
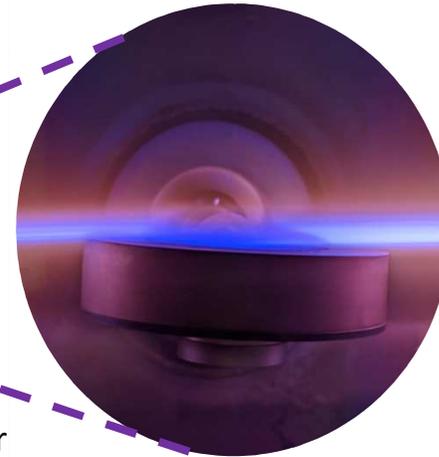
2. SPEKTRE et les plasmas froids magnétisés

- Conception
- Exemples d'études

Exemples d'études en plasmas froids magnétisés



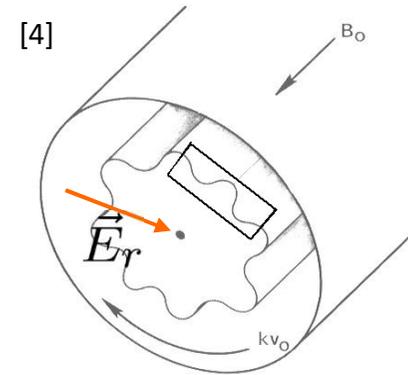
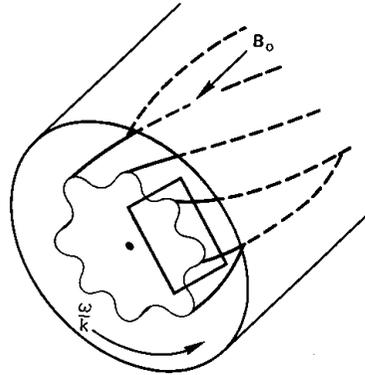
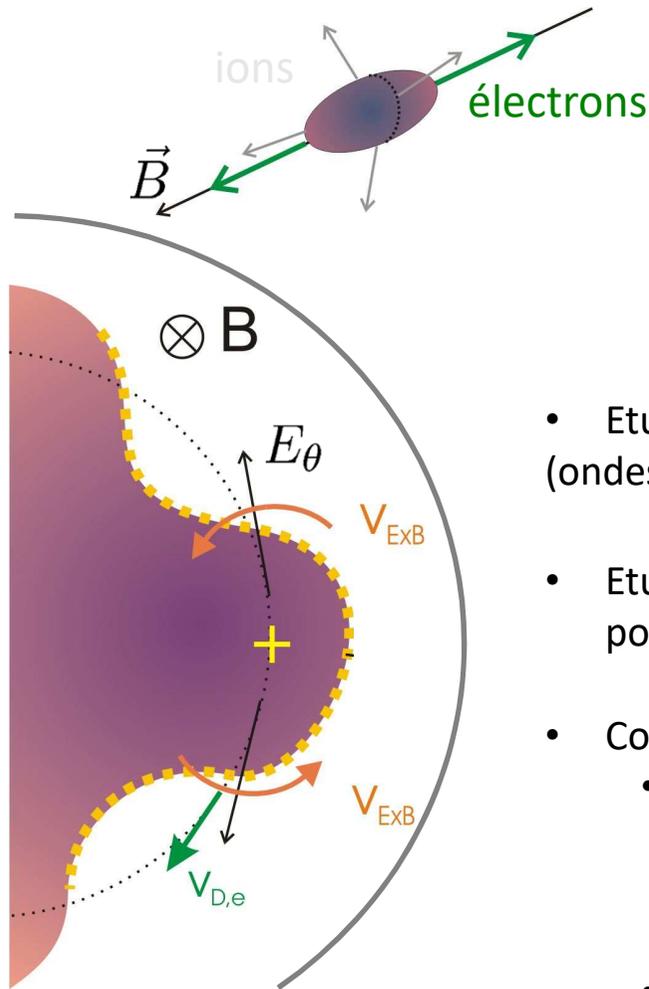
Expérience ALINE Institut Jean Lamour



- Etude et contrôle des flux de chaleur et particules sur une surface inclinée en champ magnétique.
[Cherukulappurath, PhD 2023]
- Physique des gaines (RF), étude du sputtering et des flux de matière associés en champ magnétique.
[Hiret, PSST 2023]
- Études fondamentales sur la physique des décharge et l'équilibre de la colonne de plasma magnétisé (polarisation de la colonne en fonction des conditions aux limites, isolantes ou conductrices).
- Optimisation de l'efficacité de la source hélicon pour des plasmas de grande dimension/à forte puissance.
- Possibilité d'une seconde source plasma dans la colonne, en complément de l'hélicon.
[Lehnert, Phys. Scr. 1970 - Tsushima, PRL 1986]

Expériences
&
modélisations

Exemples d'études en plasmas froids magnétisés



- Etudes des instabilités dans les plasmas avec électrons magnétisés et $\rho_i \ll R$ (ondes de dérive, instabilités de rotation...)
- Etude de la transition à la turbulence et des écoulement zonaux (grand volume -> possibilité d'obtenir des régimes de turbulence bien développée)
 - [Burin POP 2005, Fujisawa Nuc. Fus. 2008]
- Contrôle de la rotation du plasma:
 - Contrôle du champ électrique radial par l'injection de courant axial (utilisation d'électrodes aux 2 extrémités de la colonne de plasma)
 - Effets sur l'équilibre du plasma [Gueroult 2016, Désangles 2021]
 - Effets sur les instabilités
 - A titre plus exploratoire, contrôle par l'injection d'ondes ? Effets de la rotation sur la propagation d'ondes [Rax, Phys. Plasmas 2023]

Collaborations ENS Lyon (N. Plihon), LAPLACE (R. Gueroult), PIIM (A. Escarguel)

Ces études seront également menées dans la configuration « plasmas chauds »

2. SPEKTRE et les plasmas chauds

- Conception

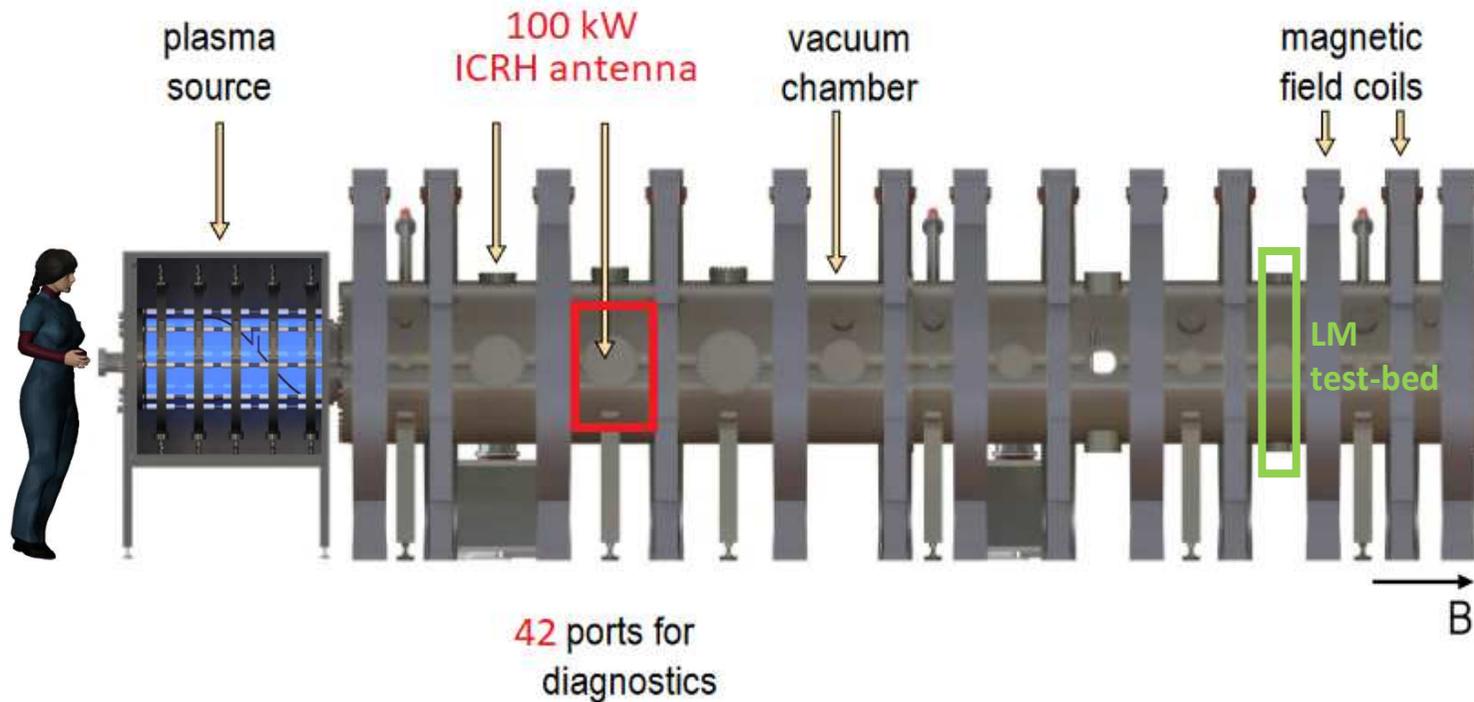
SPEKTRE et les plasmas chauds

Performances à atteindre : électrons **et ions** magnétisés : $B \rightarrow 500 \text{ mT}$ (5000 Gauss), en pulsé.
Électrons et ions « chauds » ($\sim 10 \text{ eV}$)

Conception :

2 bancs de supercondensateur (60 MJ) pour atteindre 0.5 Tesla (plateau $\geq 2\text{s}$)

Upgrade de la source hélicon 6 > 20 kW et ajout d'une antenne FCI (50 à 100 kW)



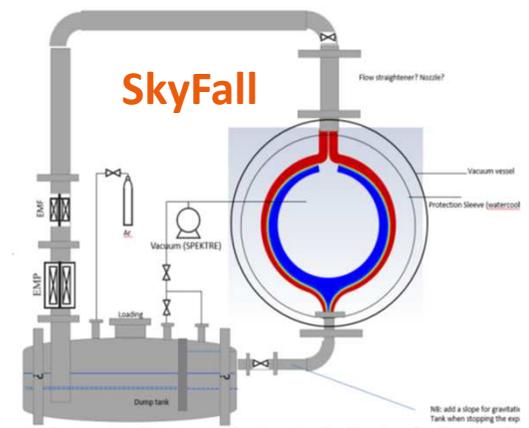
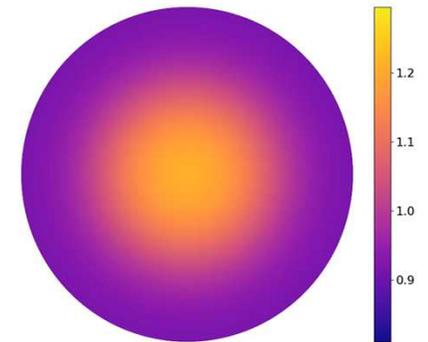
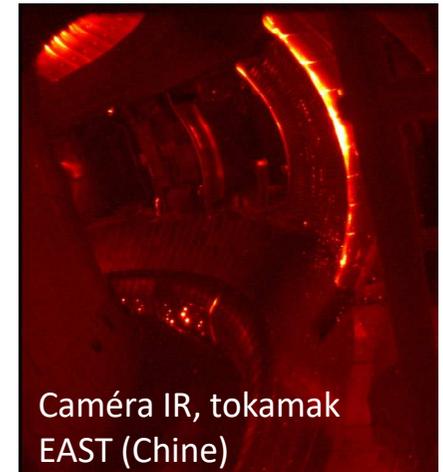
2. SPEKTRE et les plasmas chauds

- Conception
- Exemples d'études

Exemples d'études en plasmas chauds

Objectifs principaux du projet SPEKTRE :

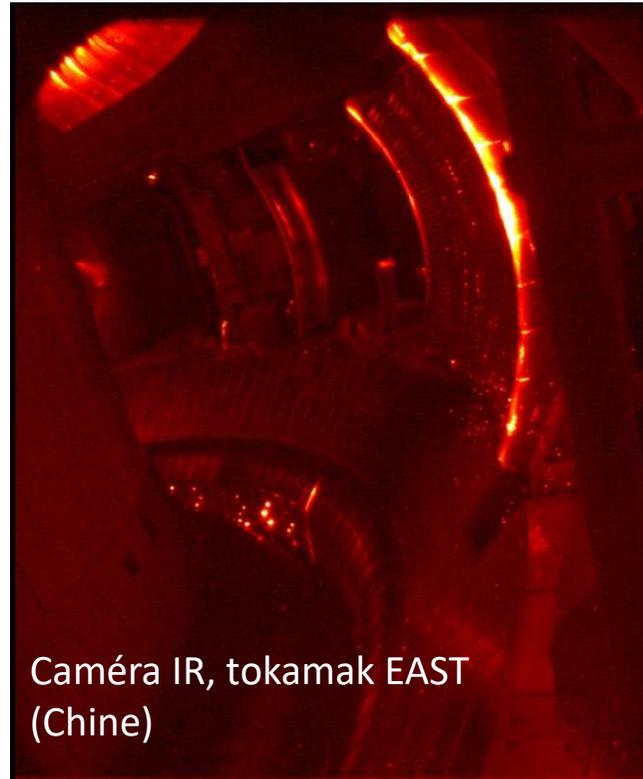
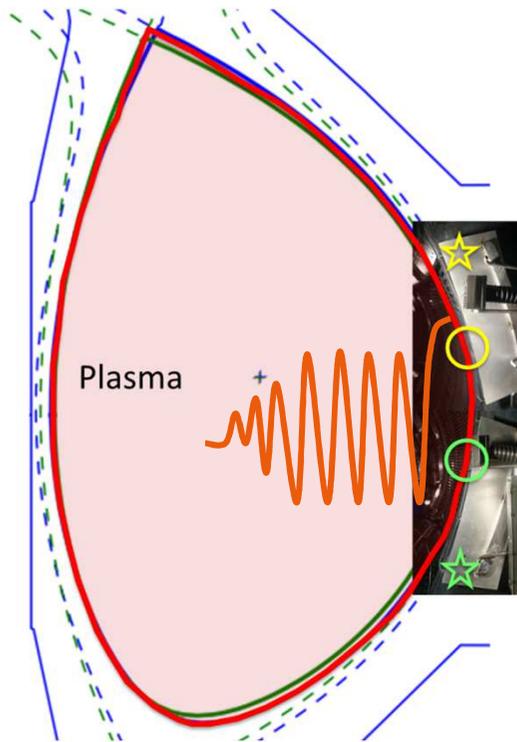
- Reproduire les conditions rencontrées au bord des plasmas de fusion (pas de réactions de fusion, pas de neutrons),
- **Optimiser le transfert de puissance pour le chauffage du plasma (chauffage par ondes FCI),**
- **Mieux comprendre les instabilités et le transport turbulent, tester des dispositifs de contrôle,**
- Conception et validation de diagnostics pour les réacteurs à fusion,
- **Reproduire les interactions plasma magnétisé / surface, et tester de nouveaux matériaux, de nouvelles approches « de rupture » (avec Renaissance Fusion),**
- Étudier des aspects fondamentaux des plasmas magnétisés et astrophysiques, former des futurs chercheurs et ingénieurs au service des futures centrales à fusion,



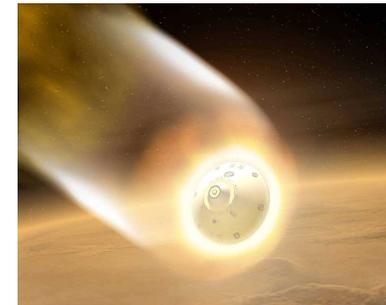
Exemples d'études en plasmas chauds

Rappel : pour la fusion nucléaire, besoin de chauffer le plasma à 150 millions de degrés

Axe d'étude SPEKTRE : optimiser le chauffage par ondes ICRH → design de l'antenne de chauffage



Localement :
flux de chaleur > 10 MW/m²



Conséquences :

- Érosion des parois (fusion du métal),
 - Éjection d'impuretés dans le plasma...
- Maintenances répétées et risques opérationnels (disruption).

[Qin 2015 – Urbanczyk 2021]

Exemples d'études en plasmas chauds

Turbulence avec $\rho_i \ll R...$ et tester des approches pour la contrôler

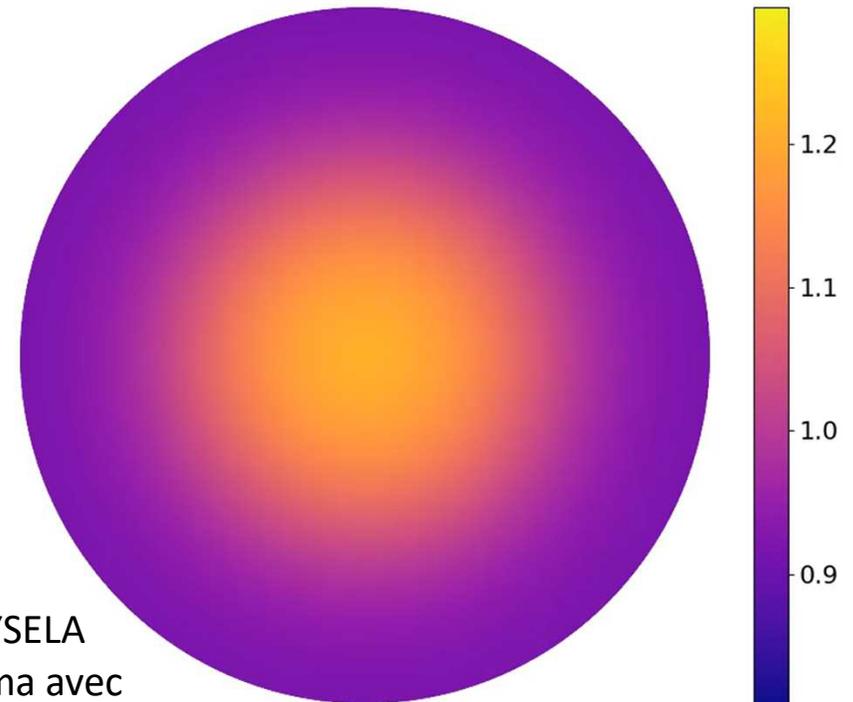
Les plasmas de fusion sont le siège d'un grand nombre d'instabilités. La plupart d'entre elles seront reproduites et étudiées expérimentalement et numériquement dans SPEKTRE.

Instabilités \longrightarrow Turbulence \longrightarrow Transport turbulent transverse \longrightarrow Déconfinement

Couplage modèles théoriques/expériences

Instabilités PVG et ITG

Transport turbulent d'impuretés



Simulation GYSELA
(densité plasma avec
source de vorticité) [G. Lo-Cascio, PhD 2023]

Exemples d'études en plasmas chauds

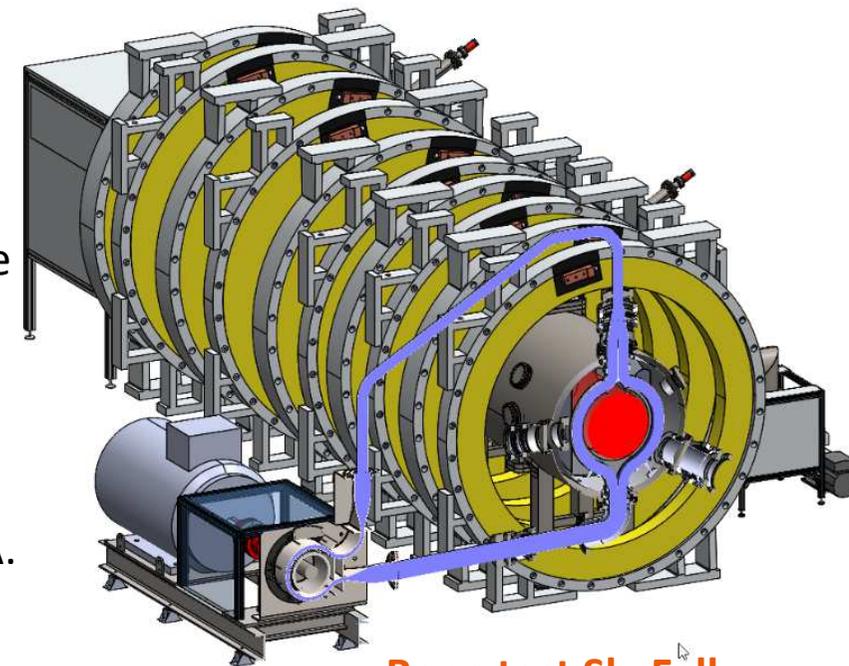
La technologie nouvelle des matériaux supraconducteurs à haute température (HTS) permet de concevoir des réacteurs à fusion compacts, plus rapides à construire et bien moins chers qu'ITER...

MAIS : design compact => flux de chaleur et de particules plus élevés sur les parois (jusqu'à 50 MW/m²).

- Besoin d'une approche de rupture pour extraire la chaleur et réduire les besoins de maintenance.
- Technologie proposée par Renaissance Fusion : **utiliser des parois en métal liquide en circulation autour du plasma.**

La technologie sera testée sur SPEKTRE

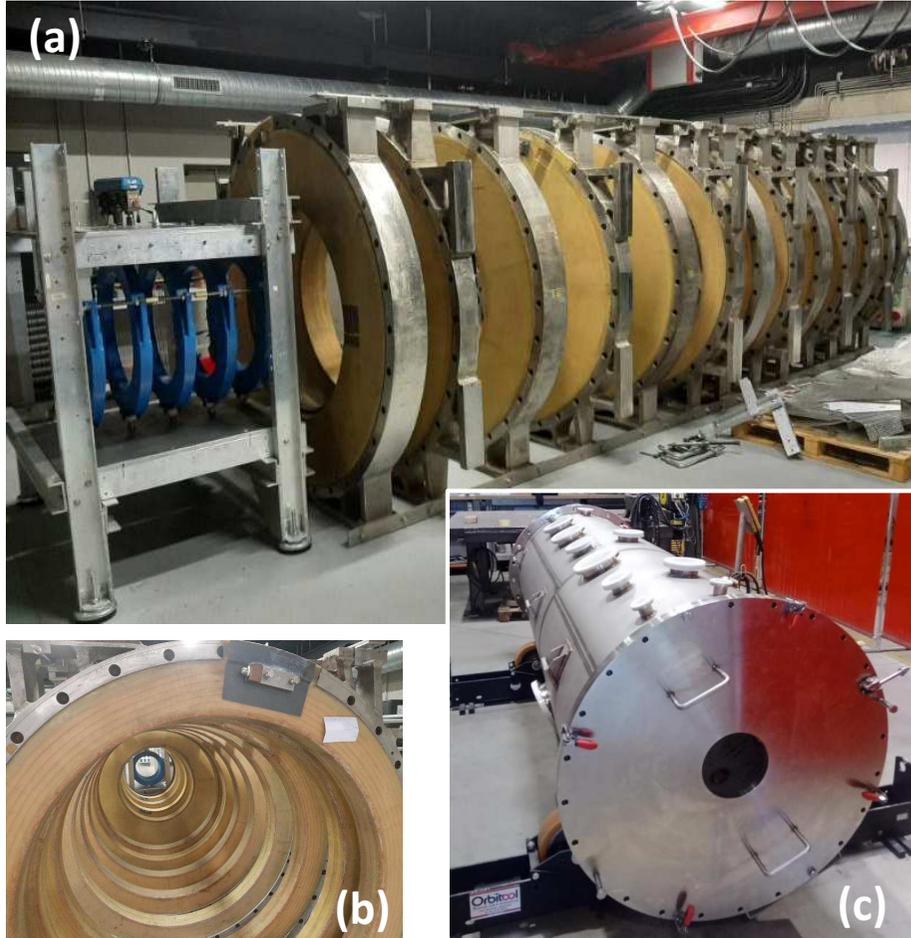
- Premiers tests en cours chez Renaissance Fusion, sans plasma
- Premiers tests avec plasma sur SPEKTRE fin 2024 : propriétés de l'écoulement (vitesse d'injection, paramètres jxB), interactions avec le plasma (vaporisation et transport d'impuretés), survivabilité du plasma, modélisation et extrapolation à un réacteur
- Mise au point de méthodes de diagnostics et de contrôle par IA.



Banc-test SkyFall

4. Calendrier prévisionnel

Calendrier prévisionnel



Aujourd'hui : bobines et source hélicon en place (a-b)

Décembre 2023 : livraison et installation de l'enceinte principale (c)

Mars 2024 : 1^{er} plasma (technique)

Automne 2024 : début 1^{ère} phase opérationnelle (B_{\max} 0.1 T)

- Études mentionnées en configuration « plasmas froids »
- 1^{ères} expérimentations avec le banc métal liquide

Sous réserve de l'obtention des financements, début de la 2^{nde} phase opérationnelle à **l'hiver 2026/2027** :

- Installation chauffage FCI et nouvelles alims de bobines
- Ions chauds et magnétisés en plasmas pulsés
- Et toujours, possibilité d'opération à 0.1 T stationnaire

Merci !

