



irfm

# Le tokamak WEST comme tremplin vers ITER

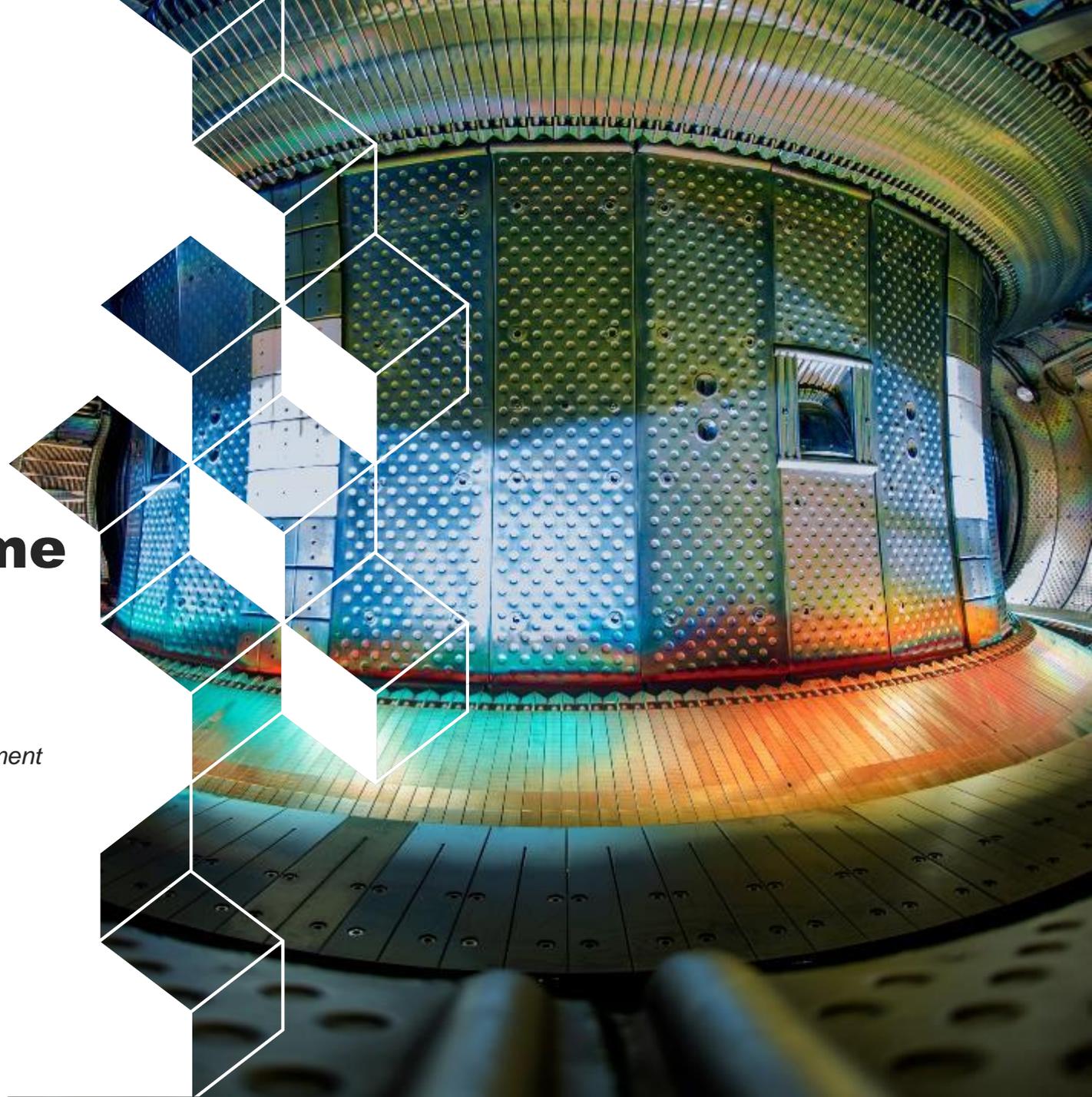
Philippe MAGAUD ([philippe.magaud@cea.fr](mailto:philippe.magaud@cea.fr))

*Directeur adjoint de l'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM)*

Ludovic ALLEGRETTI ([ludovic.allegretti@cea.fr](mailto:ludovic.allegretti@cea.fr))

*Chef du Service Tokamak Exploitation et Pilotage (IRFM/STEP)*

*Journées ITER, 27 septembre 2023*



# Sommaire

- 1. L'Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique (IRFM)**
- 2. Les projets (hors WEST) en perspective**
- 3. WEST, tremplin vers l'exploitation d'ITER → L. ALLEGRETTI**

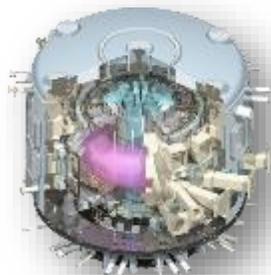


# L'Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique (IRFM)

- Environ **330 personnes** basées au CEA/Cadarache



- **3** axes de recherche



Contribuer à la réalisation du projet ITER



Préparer l'opération scientifique d'ITER



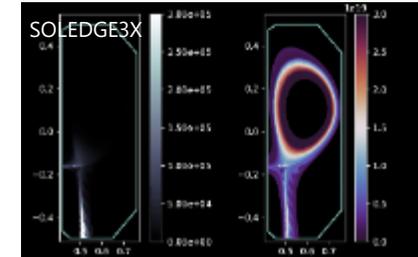
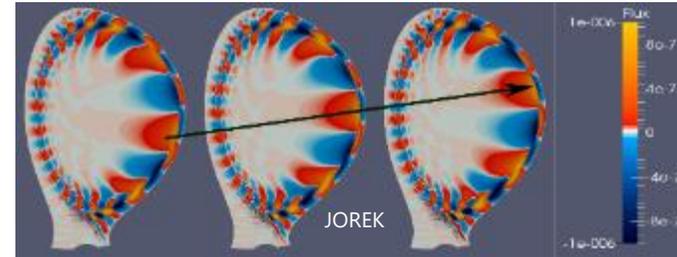
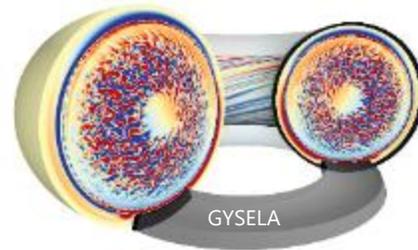
Etablir les bases d'une future centrale de fusion

# 4 domaines d'activité



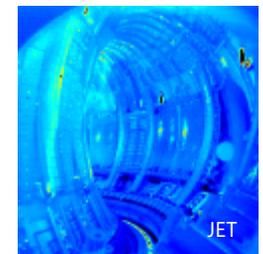
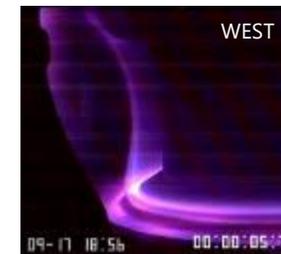
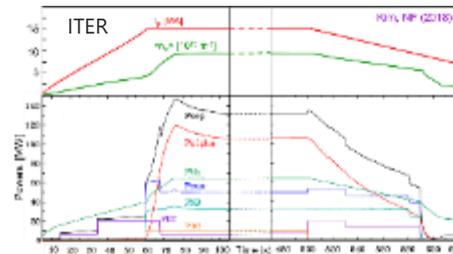
## SIMULATION NUMÉRIQUE DES PLASMAS

Approche gyrocinétique  
Approche fluide  
Simulateur de décharge



## EXPÉRIMENTATION PLASMA

Scénario et contrôle  
Plasma de bord  
Interaction plasma-paroi

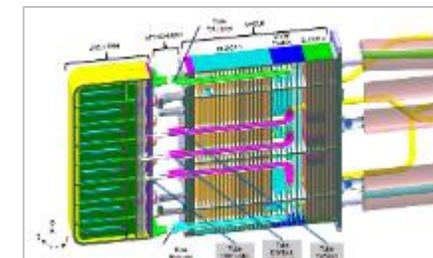
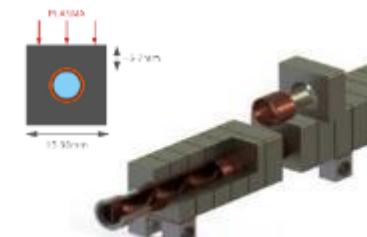
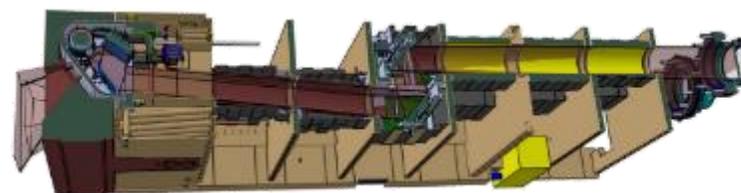


## EXPLOITATION TOKAMAK WEST – JET – JT60-SA – (ITER)

Cryomagnétisme  
Chauffages HF



## INGÉNIERIE FUSION Instrumentation Composants faces au plasma Couverture tritigène



# Une infrastructure de recherche : le tokamak WEST\*

**Champ Magnétique Toroïdal**  
**3.7 Tesla**

**Température bobines supra**  
**1.8 K (-271.4°C)**

**Grand rayon plasma**  
**2.5 m**

**Volume Plasma**  
**18 m<sup>3</sup>**

**Courant plasma**  
**1 MA**

**Puissance chauffage**  
**additionnel**  
**15 MW**

**Température plasma**  
**100 Millions °C**

**Durée max. décharge**  
**1000 secondes**

*\*évolution du tokamak Tore Supra*

# Des bancs d'essais pour le développement des technologies fusion

## HADES

Station de test à haut flux

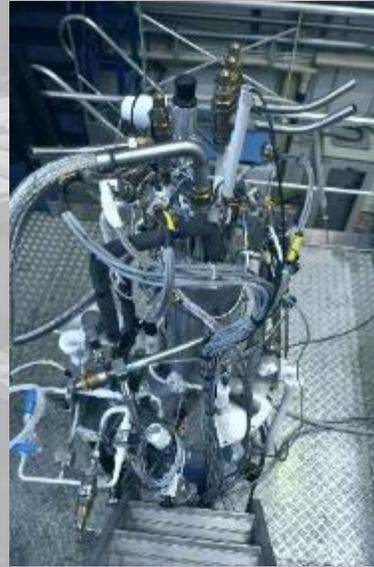


## TITAN

Station de test RF



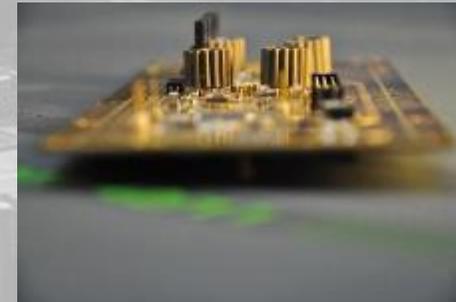
## Cryomagnétisme



## Salle de Réalité Virtuelle

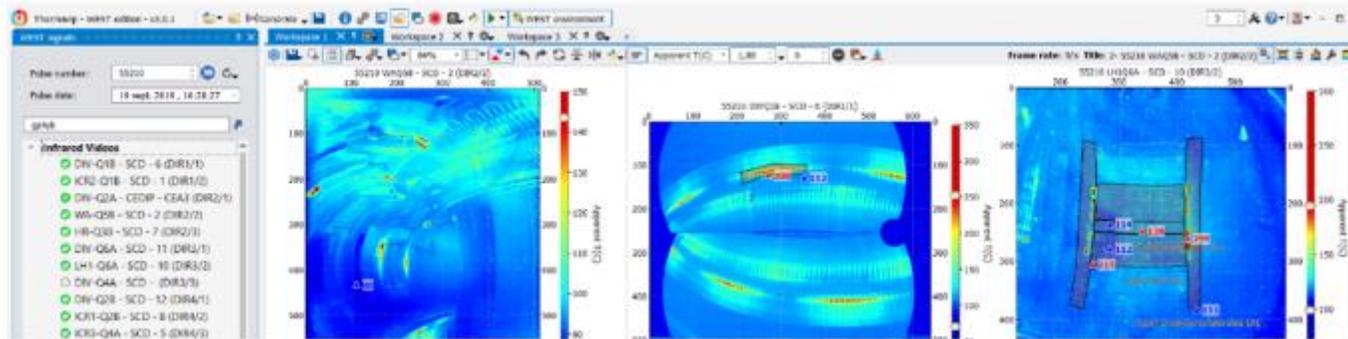


## Instrumentation



# Le projets engagés / à venir de l'IRFM et les besoins de supports potentiels

- Montée en puissance des **traitements avancés de données scientifiques et technologiques** :  
**Mots clé:** IA, deep learning, Réalité Virtuelle/Augmentée (RV/RA), gestion de configuration...  
**Besoins:** support industriel ou co-développement



Logiciel d'acquisition et de visualisation de données (ThermaVIP)



Co-développement d'une tenue ventilée utilisable pour les simulations en RV/RA

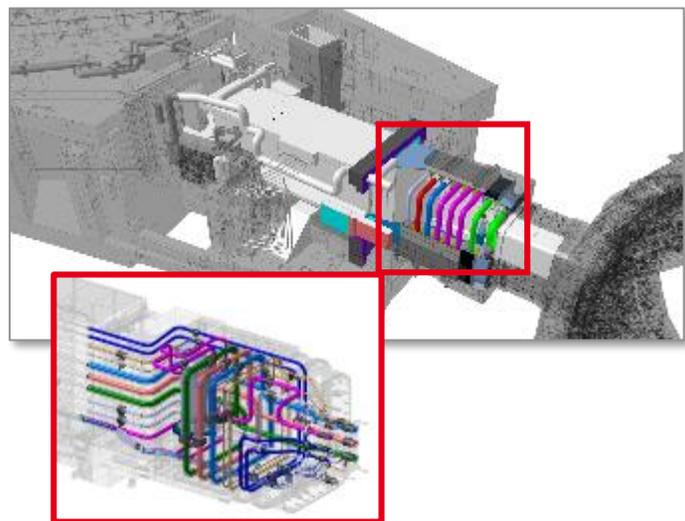
# Le projets engagés / à venir de l'IRFM et les besoins de supports potentiels

- Développement / fabrication / exploitation de bancs de tests en support à ITER:

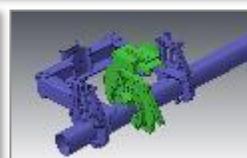
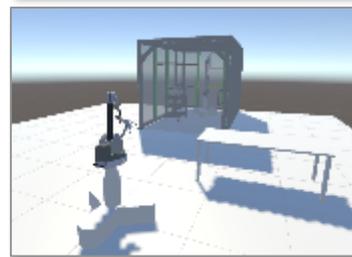
**Mots clé:** conception mécanique, fabrication, co-exploitation d'installation (vide, refroidissement, ...)

**Besoins:** support industriel

Exemple: développement des scénarios de maintenance des TBMs



*Développement du mode opératoire de soudage des tuyaux en T91*



*Validation sur maquette de petite taille... voire potentiellement à échelle 1 (2025?)*

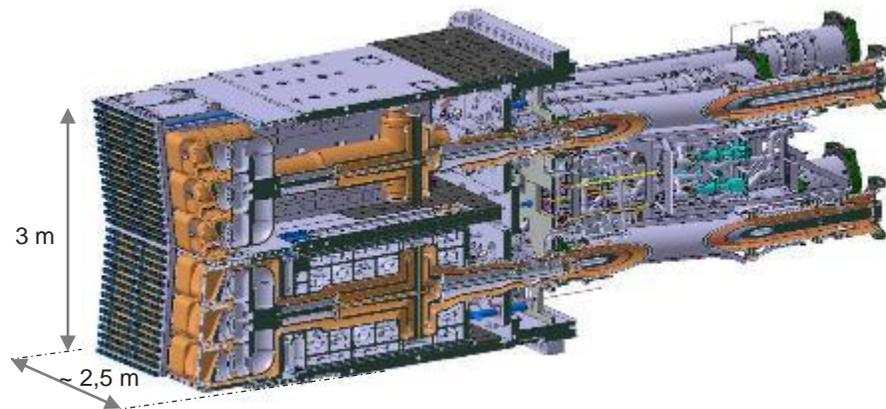
# Le projets engagés / à venir de l'IRFM et les besoins de supports potentiels

- Développement / fabrication / exploitation de bancs de tests en support à ITER:

**Mots clé:** conception mécanique, fabrication, co-exploitation d'installation (vide, refroidissement, ...)

**Besoins:** support industriel

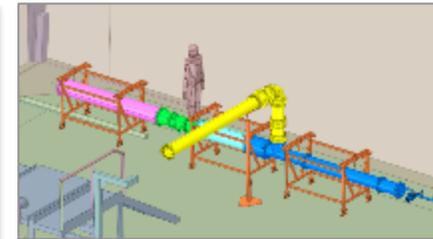
Exemple: R&D en support aux systèmes de chauffage d'ITER



Antenne ICRH d'ITER



Qualification de certains composants critiques sur les bancs test de l'IRFM...



Amélioration en cours du résonateur RF



Potentielle station de tests 1/4 antenne

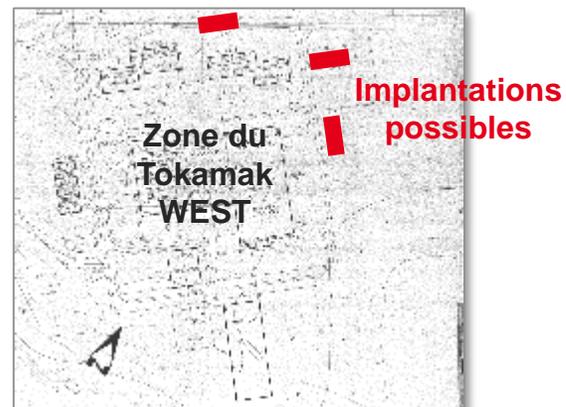
...dont certains nécessitent des améliorations

# Le projets engagés / à venir de l'IRFM et les besoins de supports potentiels

- **Projet du Campus Tritium T4E (Tritium For Energy)**, Go/NoGo attendu en début 2024
  - Un **laboratoire de R&D sur le tritium** développant des compétences scientifiques et techniques en lien avec les problématiques « sureté » et « environnementale » du tritium.
  - Un **pole ouvert** aux scientifiques et aux industriels en apportant un outil expérimental unique
  - **Formation** des futurs intervenants de la machine ITER (salariés ITER et sous-traitants) sur la base d'une Ecole Tritium

**Mots clé:** génie civil, ICPE A, boites à gants tritium, réglementation, instrumentation,...

**Besoins:** support à maitre d'œuvre



- Installation Classée Protection de l'Environnement (ICPE) soumise à autorisation
- Installation évolutive
- 800m<sup>2</sup> disponibles pour des boites à gants et utilités
- Une ligne « à faible terme source de tritium (mg) » pour les expériences de perméation/rétention et une ligne « fort terme source de tritium (g) » pour les expériences sur les systèmes (détritiation de déchet par ex.)

# L'IRFM peut aussi être en support de besoins industriels

## ■ Utilisation des bancs de tests de l'IRFM

- Tests d'étanchéité
- Des boucles sous pression
- Tests de composants sous haut flux thermique
- Tests cryomagnétiques
- Test RF
- ...



*Zone des bancs de détection de fuite*



*Caisson de test de vide, de dégazage, détection de fuite...*



*Tests sous champ magnétique*

- **IRFM en support d'expertise** sur des activités pour ITER (diagnostics, physique des plasmas, systèmes de chauffage, exploitation de tokamak,...)
- IRFM pilote d'une **formation sur la fusion** : « **Ecole Fusion pour Tous** »

# Ecole FUSION pour TOUS 17-21 Juin 2024

- Ecole **généraliste** et accessible à tous (Niveau BAC+2)
- La FUSION expliquée :
  - Par des experts des différentes disciplines
  - en **français**
  - « avec les mains »
- **1 semaine en immersion totale** entre château et labos pour **50 participants**:
  - Le château de Cadarache : **15 cours magistraux**, 1 après midi débat sur « l'énergie et la place de la fusion »
  - L'IRFM : **10 visites des laboratoires + WEST** et des systèmes auxiliaires
  - Visite d'ITER



fusion  
POUR TOUS  
ÉCOLE FUSION  
3ème édition

TOUT CE QUE VOUS AVEZ  
TOUJOURS VOULU SAVOIR  
SUR LA **FUSION**  
PAR CONFINEMENT  
MAGNÉTIQUE,  
LES **TOKAMAKS**  
**ITER, WEST**  
LES ENJEUX  
ET LES **DÉFIS**  
À RELEVÉR

17-21 JUIN 2024  
Château de Cadarache

ceva  
NUCLEAR VALLEA  
LE DÉFI DE LA SUPRACONDUCTIVITÉ

ORGANISÉE PAR LE CEA-IRFM

## SAVE THE DATE : 17-21 JUIN 2024

**CONTACT:** [Caroline.hernandez@cea.fr](mailto:Caroline.hernandez@cea.fr)

# Sommaire

1. L'Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique (IRFM)
2. Les projets (hors WEST) en perspective
3. **WEST, tremplin vers l'exploitation d'ITER → L. ALLEGRETTI**



# Le projet WIFI (WEST Infrastructure For ITER) : POURQUOI ?

**Focaliser l'effort économique régional dans la préparation du fonctionnement d'ITER** : positionner WEST comme un outil unique de formation et de mobilisation de compétences. Cet objectif est essentiel pour préparer les laboratoires et les industriels régionaux à l'exploitation scientifique et technique d'ITER.

- Formation des scientifiques dans l'élaboration, la conduite et l'analyse des expériences sur les plasmas
- Acquisition de compétences en maintenance et exploitation d'une installation de fusion.

**en mettant à niveau la plateforme WEST → Support CPER**

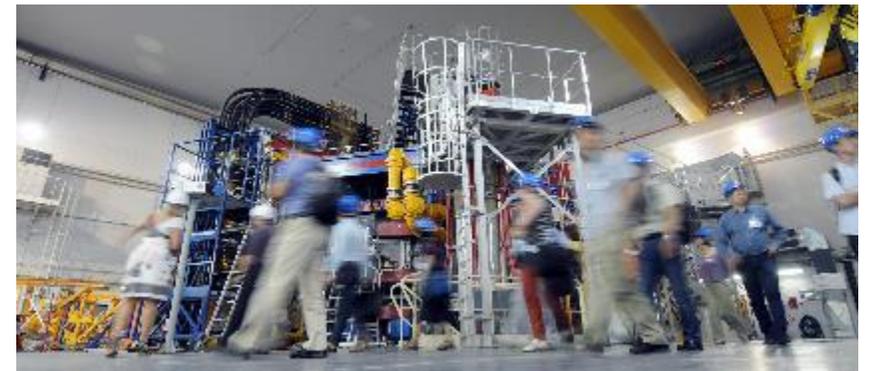
- Installation du système de chauffage principal d'ITER (ECRH)
- Installation d'une troisième tour de refroidissement (plasmas de 1000s)

et en **impliquant plus systématiquement les industriels dans l'opération du tokamak WEST**

- Mise en place de contrats de sous-traitance pour l'opération des systèmes continus : cryogénie, réfrigération, électrotechnique, ultravide, etc.



*Salle de commande WEST*



*Hall tokamak WEST*



# Le projet WIFI : avec QUI ?

WIFI associe le CEA et son institut fusion:

- à la **communauté scientifique nationale (FR-FCM)** et localement à l'ISFIN (AMU)
- au programme fusion européen (EUROfusion)
- à ITER (ITER-organisation et l'agence européenne F4E)
- à l'industriel français THALES, qui par cette participation, consolidera son positionnement pour la fourniture de tels moyens de chauffage
- au **tissu industriel impliqué dans la maintenance et l'exploitation technique de WEST**



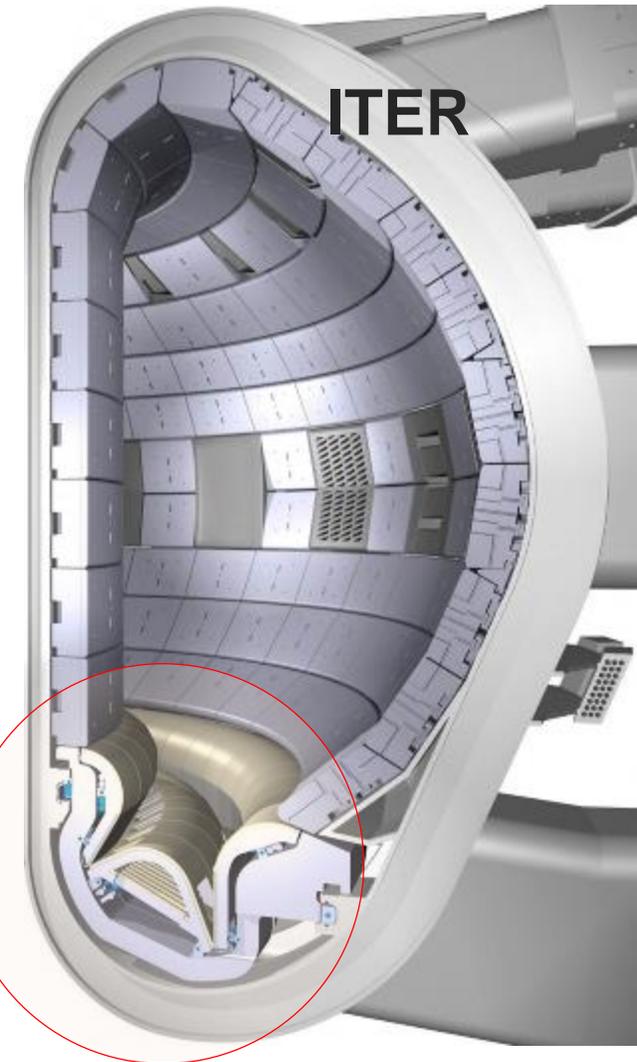
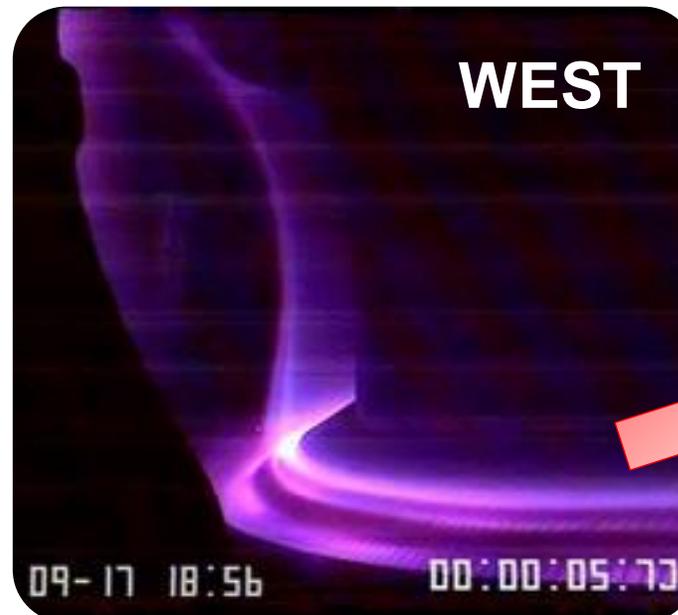
# Les missions de WEST, infrastructure de recherches du MESRI

« Préparer ITER et se préparer à ITER »

Ouvrir la voie pour la construction et l'exploitation du divertor  
activement refroidi en tungstène d'ITER

Maîtriser les scénarios plasmas intégrés sur des durées  
d'équilibre avec la paroi en environnement métallique

***WEST : élément clé  
de la feuille de route  
nationale fusion***



# WEST : une plateforme en préparation de l'opération ITER

Plateforme technique conçue pour produire des plasmas de fusion de longue durée (jusqu'à 1000s) avec flux de chaleurs extrêmes (jusqu'à 20MW/m<sup>2</sup>)

- Chambre à vide de 50 m<sup>3</sup> (~10<sup>-5</sup> Pa)
- Composants face au plasma W / Cu / SS activement refroidis (70°C, 24 bars)
- Champs magnétique toroïdal de 4 T → 18 aimants supraconducteurs (NbTi at ~1.8 K)
- Puissance de chauffages additionnels de ~20 MW
- ~250 MW de puissance électrique installée
- ~ 40 diagnostics (mesures et contrôles rapides)

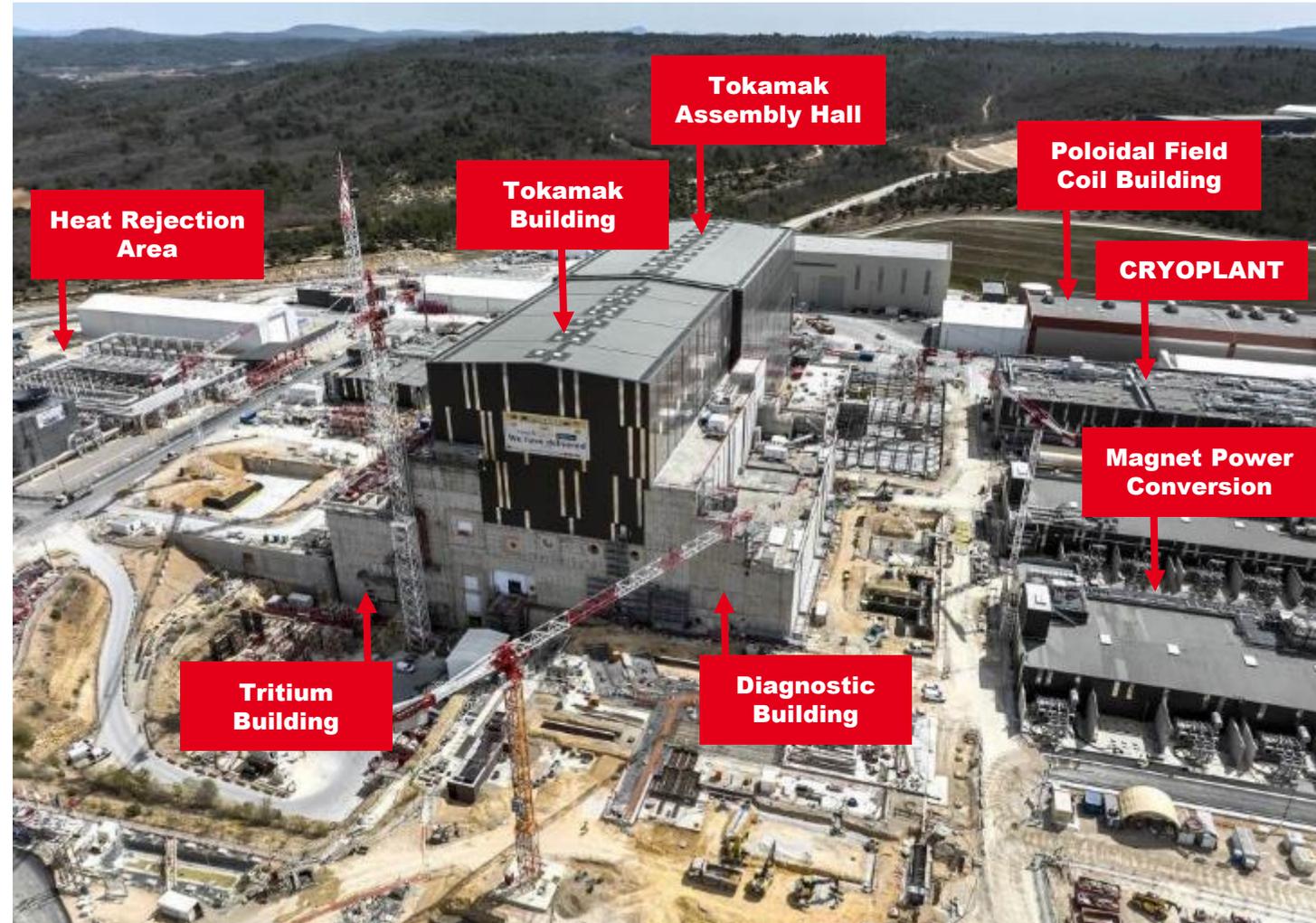


# L'opération du tokamak WEST, dans la perspective ITER

Les sous systèmes caractéristiques de WEST qu'on retrouve dans ITER :

- Usine cryogénique
- Boucles de refroidissement (eau pressurisée, etc...)
- Alimentations électriques de puissance
- Transformateur 400 kV
- Systèmes de chauffages ondes HF
- Systèmes ultra-vide
- Contrôle-commande

**Projet WIFI : intervention accrue des industriels locaux leur ouvrant des perspectives sur ITER**



Vue aérienne du chantier ITER en Avril 2022

# Caractéristiques techniques des installations WEST (1/3)

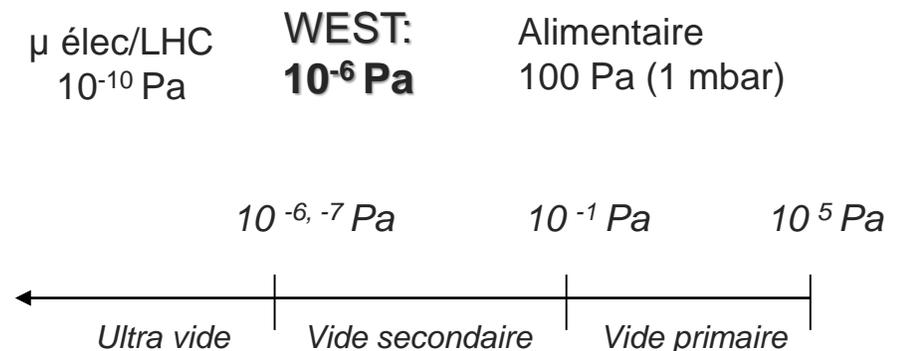
## Boucles d'eau

- Fonctionnement continu 24/7 et pulsé
- Plusieurs boucles pour l'extraction de puissance et le conditionnement du Tokamak
- 2 TAR (+1 en construction) soumises à contrôle et autorisation DREAL

## Pompage

- Mise sous vide de l'enceinte principale (plasma) et des enceintes périphériques (isolations thermiques)
- Env. 24 pompes (primaires, roots, turbomoléculaires) en fonctionnement 24/7
- Mise en œuvre de matériaux peu dégazants, de moyens d'essais et de détection des fuites

	Baking Operation	Plasma Operation
Thermal Power Removal Capacity	-	12 MW (steady-state)
Coolant Inlet Temperature	200 °C	70 °C
Loop Flow Rate	150 m <sup>3</sup> /h	1800 m <sup>3</sup> /h
In-Vessel Water Volume	9 m <sup>3</sup>	
Total Loop Water Volume	35 m <sup>3</sup>	
Centrifugal Pumps	2x 300 kW	
Heat Exchanger	12 MW / 130 m <sup>2</sup>	
Heater	280 kW	



# Caractéristiques techniques des installations WEST (2/3)

## Installation cryogénique

- Système critique pour le maintien en froid de l'aimant supra → fonctionnement continu 24/7
- 3 températures d'opération 80K (écran thermique), 4K (boîtiers) et 1,8K (hélium superfluide pour l'aimant)
- Usine cryogénique : compression, pompage, distribution, stockage des fluides cryogéniques

## Distribution électrique

- Puissance requise en continu pour les sous-systèmes, et en pulsé durant les plasmas (poloïdal et chauffages additionnels)
- 2 sources de puissance :
  - 15kV en continu (réseau CAD) 4 sous-stations, 7 transformateurs → Puissance totale de 10 MVA (Cryo 1,6MVA – REF 1,5MVA)
  - 400kV pour les systèmes pulsés (WEST → seul poste 400kV opéré hors EDF)

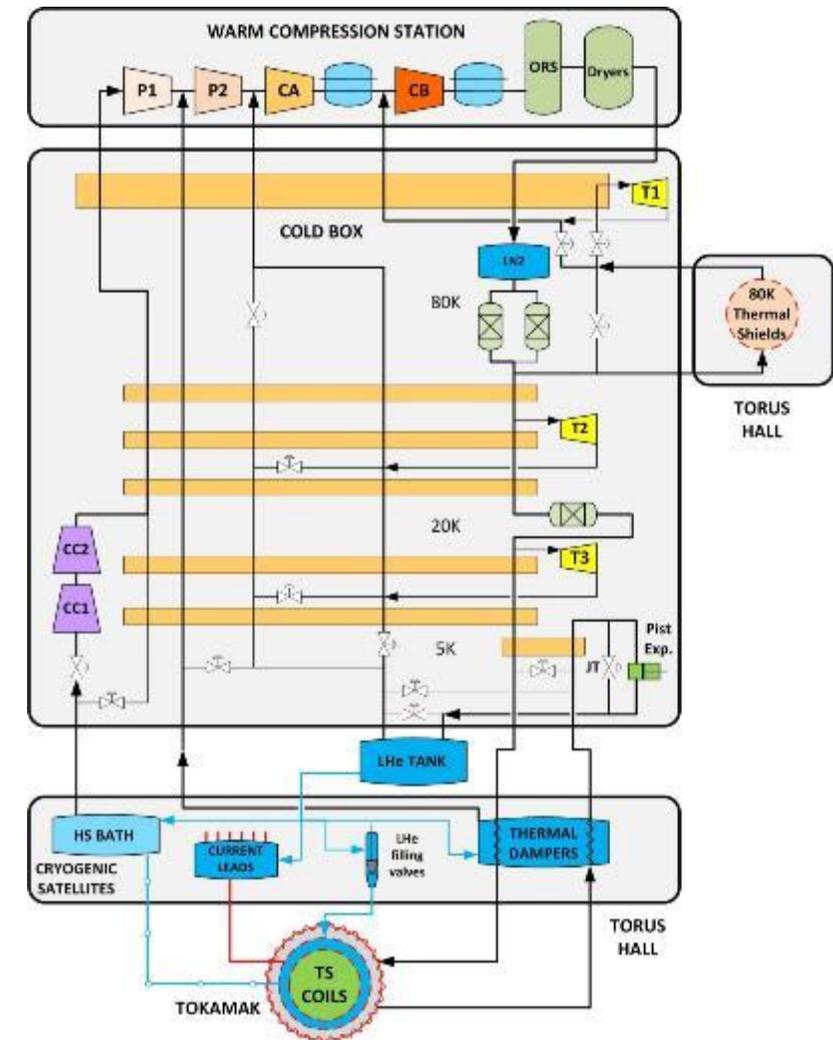
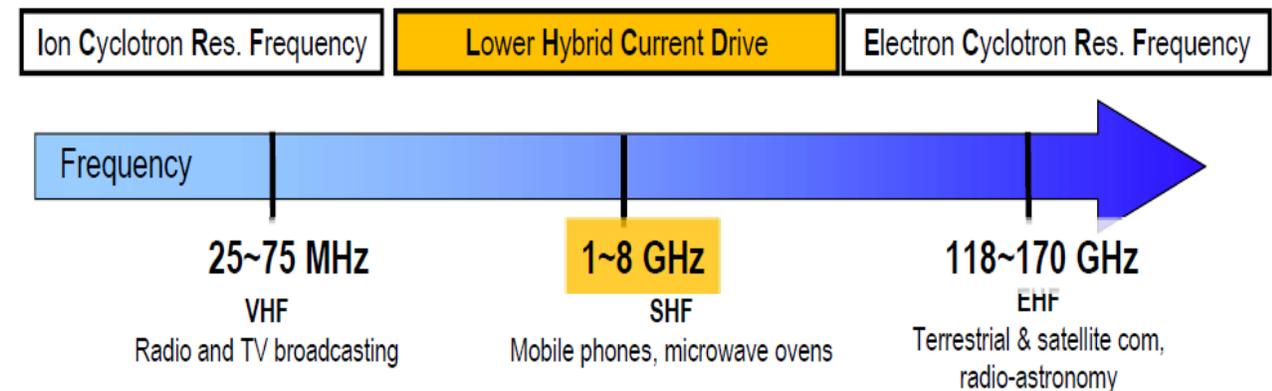
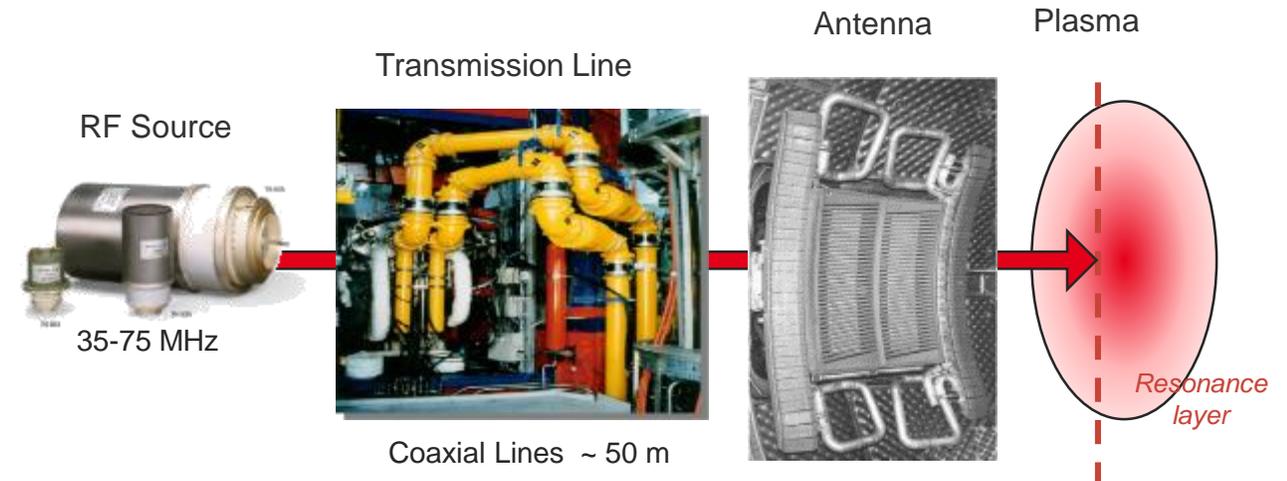


Schéma fonctionnel CRYOPLANT WEST

# Caractéristiques techniques des installations WEST (3/3)

## Systèmes de chauffage additionnel du plasma par ondes électromagnétiques hautes fréquences

- ICRH (Ion Cyclotron Resonance Heating)
  - 3 antennes installées
  - 12 MW (3MW-1000s) – 6 tétrodes Thales TH525 @ 35-75MHz
- LHCD (Lower Hybrid Current Drive)
  - 2 antennes installées
  - 9,2MW (1000s) – 16 klystrons Thales TH2103C @ 3,7 GHz
- ECRH (Electron Cyclotron Resonance Heating)
  - 1 antenne en cours d'installation
  - 3MW (1000s) – 3 gyrotrons Thales TH1507U @ 105GHz (opérationnels en 2024)



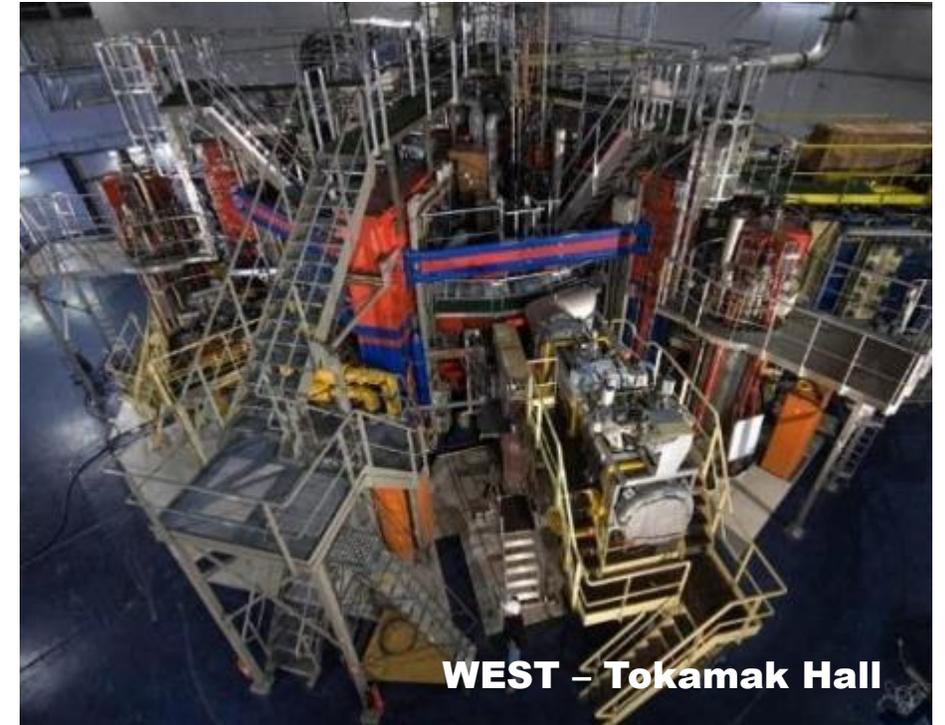
# Le projet WIFI : impact socio économique

## WEST en quelques chiffres

- Budget annuel d'exploitation : 14 M€ (coûts complets)
- Personnel d'exploitation : 100 ETP
- Personnel scientifique local (CEA/AMU) : 100 ETP
- Visiteurs scientifiques (nationaux, européens et internationaux) : 50

## Retombées du projet WIFI

- Accroissement du financement européen (EUROfusion) grâce aux nouvelles capacités de la machine
- Financement de l'emploi scientifique
- Emploi : création d'emplois pérennes dans l'industrie pour WEST avec possibilité de levier important sur ITER
- Rayonnement scientifique régional sur ITER (AMU/Université Côte d'Azur/CNRS/INRIA/CEA)
- Formation de scientifiques, ingénieurs et techniciens de haut niveau (Formations diplômantes/Ecoles Universitaires de Recherche/Apprentissage)



# Maintenance et exploitation des installations WEST

## Principaux contrats de sous-traitance en support aux activités IRFM

- **Contrat d'assistance à la maintenance et exploitation – Equivalent 3 ETP**
  - Renfort des capacités d'intervention en bénéficiant de l'expérience et des méthodes d'un prestataire industriel,
    - Maintenances préventives ou correctives des systèmes, rondes et contrôle
    - Equipes multi-compétences : électrotechnique, mécanique, réseaux fluides, machines tournantes, automatisme
  - Périmètre technique large :
    - Production d'eau, boucles de réfrigération, distribution HT/BT (400 kV RTE / 15 kV CAD), alims de puissance, usine cryogénique, réseau gaz comprimés (Air, He et N2), réseau de pompage vide et ultravide
  - Outil GMAO support centralisant les gammes techniques (+ de 500 gammes)
- **Gestion de l'atelier mécanique (Atelier) – Equivalent 3 ETP**
  - Prestation d'usines et d'exploitation de l'atelier mécanique IRFM
- **Recherche de fuite – Equivalent 1,5 ETP**
  - Prestation de moyen et d'expertise
- **Contrat multiservices – Equivalent 3 ETP**
  - Gestion du magasin machine et prestation support installation et manutention



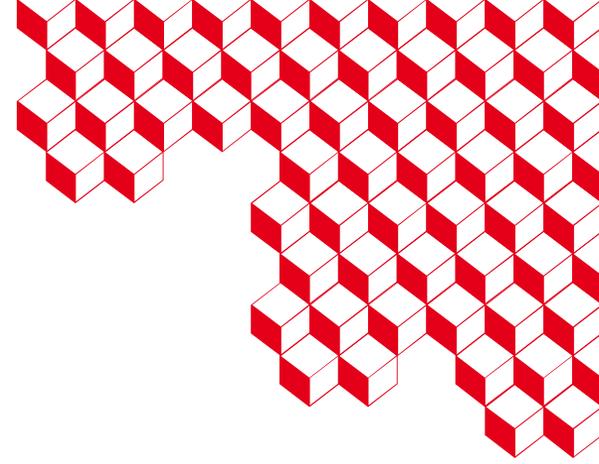
# WEST tremplin vers ITER



WEST



irfm



**Merci pour votre attention**