

# Les enjeux de la radioprotection dans le développement du projet ITER

Yannick Le Tonqueze – ITER Organization



# Plan

1. ITER et la radioprotection
2. Principales sources radioactives
3. Modes de fonctionnement d'ITER et nature des risques radiologiques
4. Démarche d'ingénierie de radioprotection
  1. Cartes radiologiques et développements associés
  2. Démarche ALARA intégrée
5. Système de surveillance de la radioprotection
  1. Périmètre et architecture
  2. calendrier des contrats
  3. Evaluation des besoins
6. Conclusion

# 1 – ITER et la radioprotection

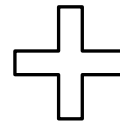
- ITER est une Installation Nucléaire de Base (INB 174 – décret 2012-1248) avec 2 fonctions de sureté :
  - **Confinement des matières radioactives et toxiques**
  - **Limitation de l'exposition aux rayonnements ionisants**

## Réglementation applicable

**Code de la santé publique  
Code de l'environnement**

L.1333-[1..20]

R.1333-[1..112]



**Code du travail**

L.4451-[1..2]

R.4451-[1..144]

Décrets (Décret n° 2018-434, 437. 438)

Arrêtés (Arrêté du 28 janvier 2020 modifiant l'arrêté du 15 mai 2006)

Décisions, Guides ASN, Prescriptions techniques spécifiques à ITER

Instructions / Directives / Recommandations / Lettres / Avis / Note + réglementation internationale (AIEA, ICRP...)

- **Les enjeux de radioprotection vont progressivement monter en importance** avec la radiologie industrielle en phase de chantier (en cours), suivie des premiers plasmas avec l'émission de neutrons et de rayonnements gammas induits avec des puissances faibles (~2029) jusqu'à la phase DT (>2035) avec une production massive de neutrons.

# 1 – ITER et la radioprotection

- Les objectifs retenus pour ITER quant à l'exposition du personnel et du public aux rayonnements ionisants sont présentés dans le tableau suivant :

	Travailleurs	Public & environnement
Situations normales	ALARA et en tout état de cause: Dose efficace indiv. annuelle moyenne (travailleurs exposés) $\leq 2.5\text{mSv/yr}$ Dose efficace indiv. Max: $\leq 10\text{ mSv/yr}$	Rejets inférieurs aux limites autorisées pour l'installation. Impact aussi faible que possible, et dans tous les cas inférieur à : $\leq 0,1\text{ mSv/an}$
Situations incidentelles	ALARA et en tout état de cause: Dose efficace indiv. Induite par une situation incidentelle: $< 10\text{ mSv}$	Rejets par incident inférieurs aux limites annuelles autorisées pour installation: $\leq 0,1\text{ mSv}$
Situations accidentelles	Prend en compte les contraintes liées à la gestion de la situation accidentelle et post-accidentelle	Pas de contre-mesures immédiates ou différées (confinement, évacuation): $< 10\text{ mSv}$ Pas de restriction alimentaire (animaux ou végétaux)
Accidents hypothétiques	Pas d'effet de falaise ; contre-mesures éventuelles limitées dans le temps et l'espace	

- Par ailleurs, ITER s'est fixé un **objectif de dose collective annuelle moyenne de 500 hommes.mSv/an**
- En conséquence, des efforts importants sont réalisés pour :
  - Le **respect du zonage radiologique**, notamment lorsque la machine est en fonctionnement (Mode 0 – Plasma)
  - La mise en œuvre d'une **démarche ALARA** formalisée afin de respecter les objectifs individuel et collectif
  - La **maitrise du confinement**, notamment lors des opérations de maintenance

## 2 – Principales sources radioactives

Risque de contamination

Risque d'exposition externe

TRITIUM

poussière activée

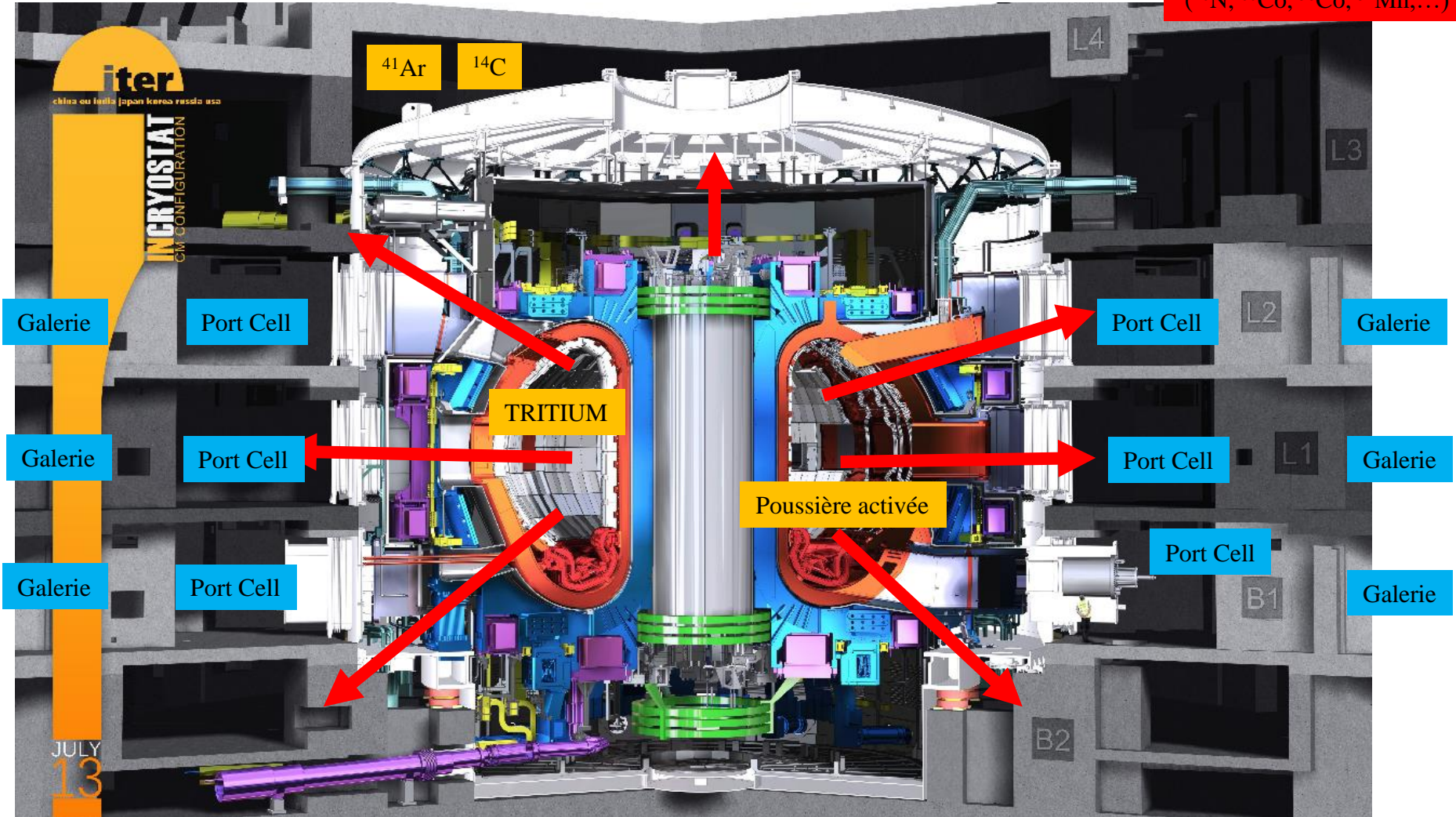
$^{41}\text{Ar}$

$^{14}\text{C}$

NEUTRONS (14 MeV)

Gammas prompts

Gammas d'activation ( $^{16}\text{N}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,...)



Machine TOKAMAK

ATSR 2021

IDM UID:  
ITER\_D\_5JSMYR

Page 5

# 3 – Modes de fonctionnement d'ITER et nature des risques radiologiques

ITER est une machine fonctionnant en **régime pulsé sur des durée allant de 100 s à plusieurs milliers de secondes**, les enjeux de radioprotection sont donc différents selon les modes de fonctionnement:

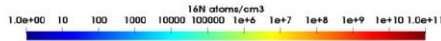
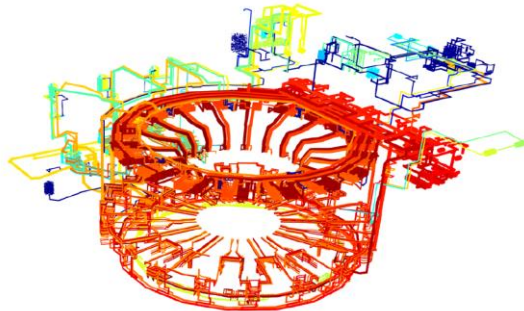
- **Mode 0 : Plasma Deutérium-Tritium de centaines à milliers de secondes (Pulse)**
- **Mode 1 : Maintenance**
  - « **Mode maintenance** » (avec **interventions humaines**), lorsque le Tokamak est en arrêt soit pour de « petites interventions » (1 à 30 jours), ou des plus longues (plusieurs mois)
- **Mode 2 : Maintenance lourde**
  - **Transferts automatisés de composants activés (sans présence humaine)** du bâtiment Tokamak (B11) vers le bâtiment des cellules chaudes (B21)



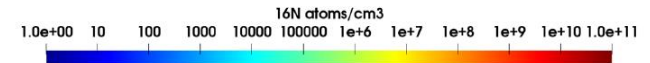
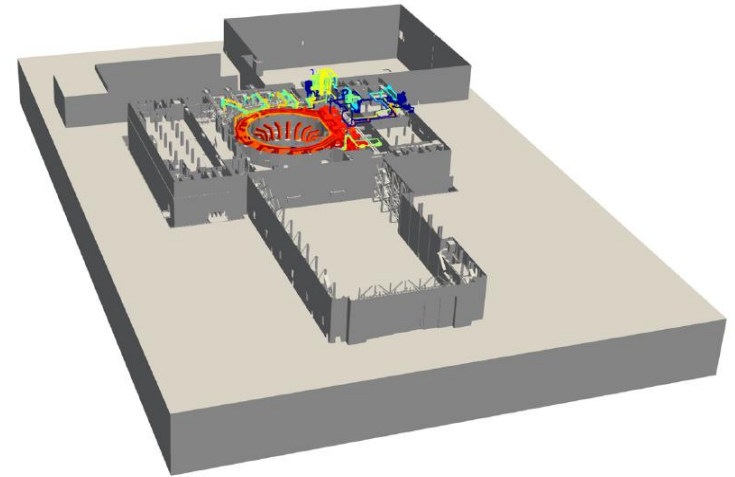
## Mode 0 : Plasma

### • Les rayonnements prépondérants :

- **Neutrons du plasma DT (14 MeV):**  $1.7 \cdot 10^{20}$  n/s à 500 MW (puissance nominale) – Plasma de 450s
- $\gamma$  prompts issus des collisions inélastiques
- **Eau circuit primaire de refroidissement:**  $^{16}\text{N}$  (production importante de Gammas:  $10^{17}$   $\gamma$ /s ), ainsi que des neutrons  $^{17}\text{N}$  (contribution moindre)
  - $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$  (neutrons d'énergie  $> 10.5 \text{ MeV}$ )
  - 6,13 MeV ( $I_\gamma \sim 69\%$ ), 7,12 MeV ( $I_\gamma \sim 5\%$ )
  - Avec  $T_{1/2} = 7,13\text{s}$



Circuit de refroidissement en eau "TCWS" d'ITER



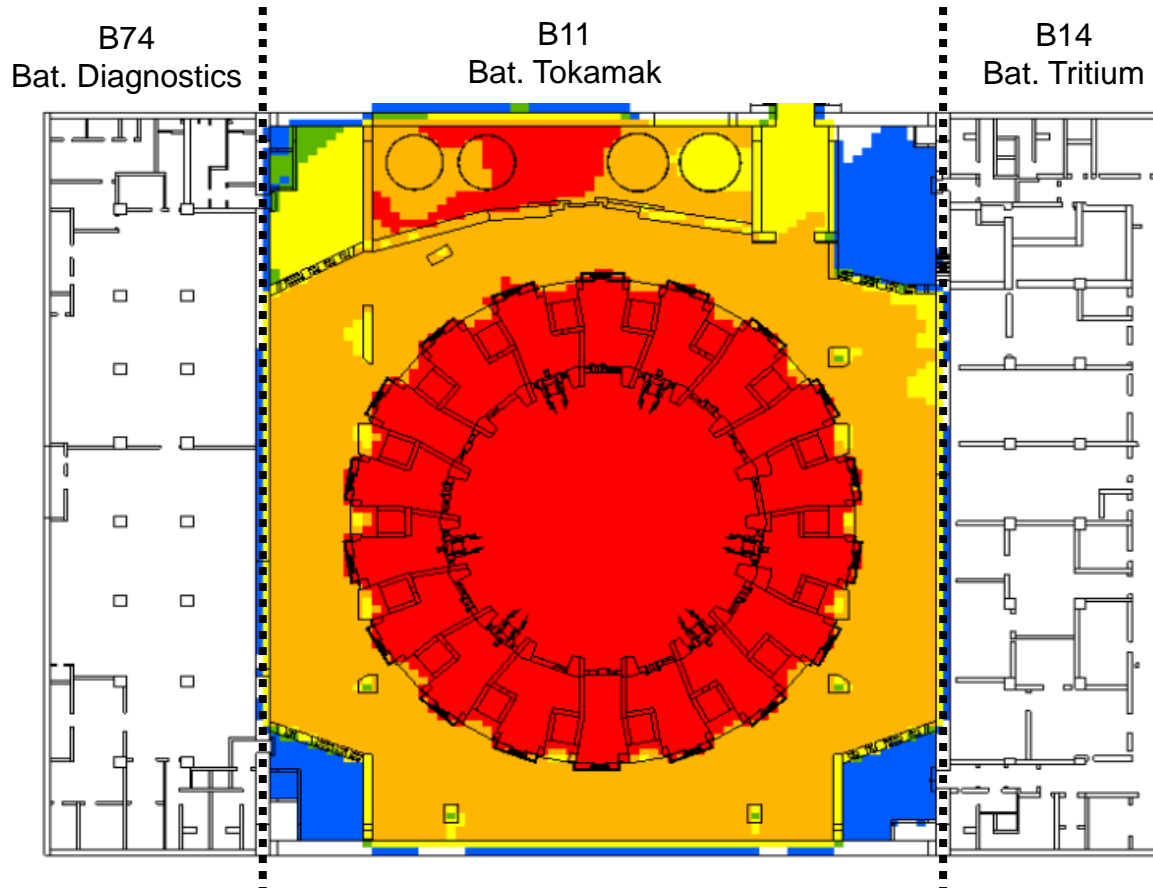
### • Plusieurs décades en dessous :

$^{17}\text{N}$ ,  $^{19}\text{O}$ , activation des matériaux, produits de corrosion activés (ACP) de l'eau du circuit primaire de refroidissement

## Mode 0 : Plasma

### Zonage et carte radiologique :

- Zonage radiologique (RPrS): B74 (Bleu), B11(rouge), B14 (Vert)
- Carte radiologique mode 0 en 2021:



Vue de dessus du bâtiment Tokamak complex – Niveau B1 (sous-sol)



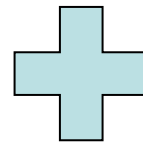
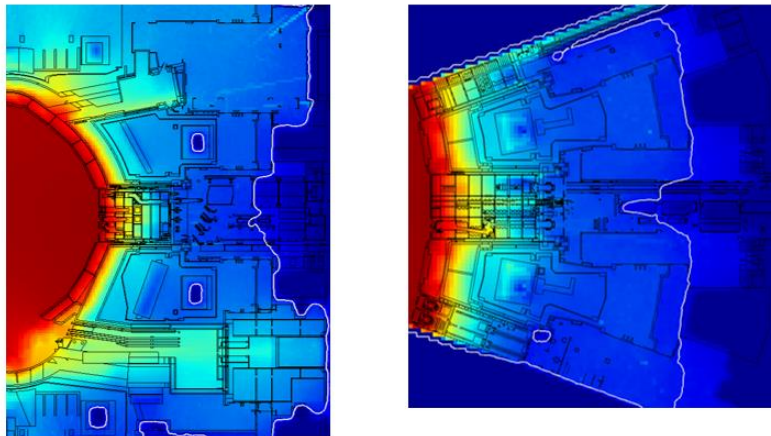
## Mode 1 : Maintenance

- Les rayonnements prépondérants :

- Gammas d'activation ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ...) des structures et systèmes et béton ( $^{24}\text{Na}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ...) du génie civil.
- Gammas provenant des produits de corrosion activés (ACP:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ )
- Les débits de dose sont évalués en fin de vie (fluence neutrons maximale:  $3.10^{27}$  n / 4700h de plasma) et après un temps de refroidissement (24h)

Zonage radiologique en mode 1:

- Zone jaune (Port cell)
- Zone verte (Galerie)



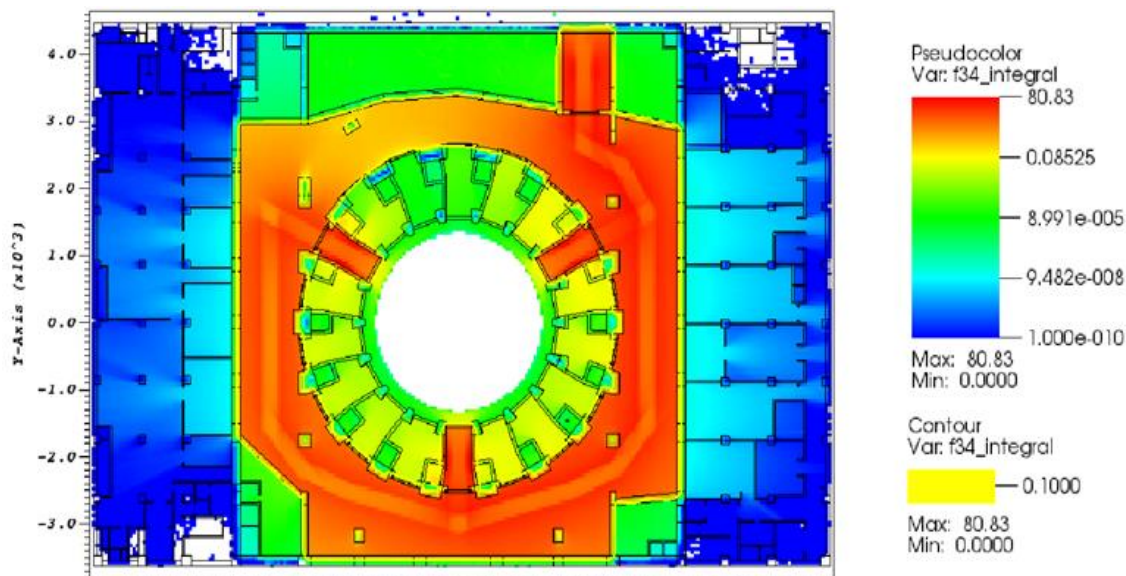
Enjeux de radioprotection  
Complémentaires:  
Opérations de maintenance sur la première barrière de confinement (Tritium, aérosols  $\beta\gamma$ ) et sur le système de refroidissement (ACP ( $\beta\gamma$ ))

$10^6$  s (12 jours) d'arrêt en fin de cycle de vie - le port equatorial no 12 (Ligne blanche  $100 \mu\text{Sv/h}$ )

## Mode 2 : Maintenance Lourde

- **Les rayonnements prépondérants :**

- Gammas d'activation ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ...) des composants internes (couvertures internes, cassettes de divertor, port plug) de la machine transférés dans le bâtiment Tokamak
- Sources de rayonnements similaires au Mode 1, mais avec une intensité plus importante car équipements activés au sein de la machine
- Zonage radiologique: B74 (Bleu), B11(rouge), B14 (Vert)



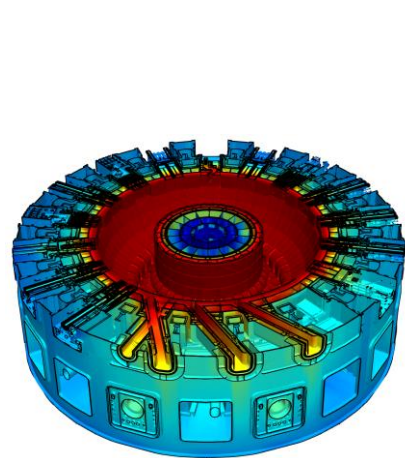
Carte de Dose intégrée dans le Tokamak complexe

Dans bâtiment tritium (B14), la dose la plus élevée induite par ces 54 transferts, calculée par plusieurs itérations, est de l'ordre de  $10^{-7}$  Gy.

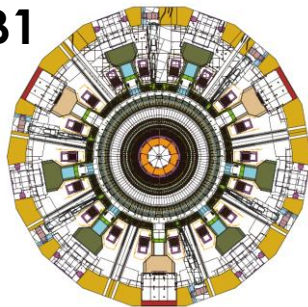
## 4 – Démarche d'ingénierie de radioprotection

### Exemple 1 : Cartes radiologiques et développements associés

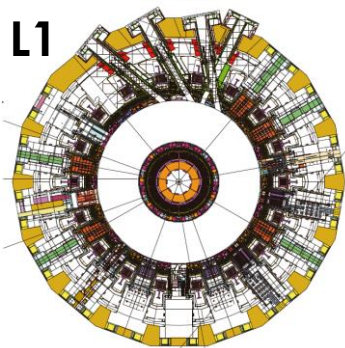
- **Production de modèles MCNP « Machine » et « bâtiment » exceptionnels :**



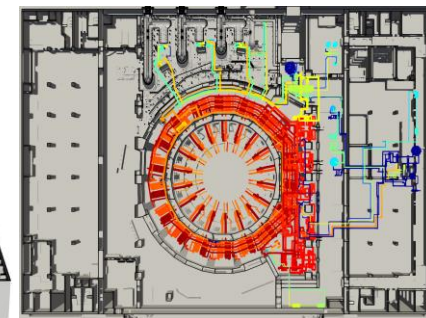
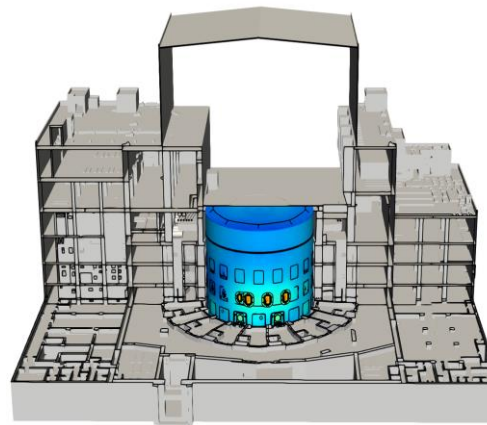
Niv. B1



Niv. L1



E-lite MCNP model  
> 325 000 cells, > 560 000 surfaces



TK complex MCNP model  
> 57 000 cells, > 80 000 surfaces



- **Développement de nouveaux codes: D1S-UNED (évolution MCNP)**
- **Développement de nouveaux matériaux de radioprotection pour les neutrons:**
  - Mortier léger ( $1.1\text{g/cm}^3$ , %H>7, %B>5)
  - Matériau remplaçant le polyéthylène ( $1.1\text{g/cm}^3$ , %H>10, %B>5) résistant au feu

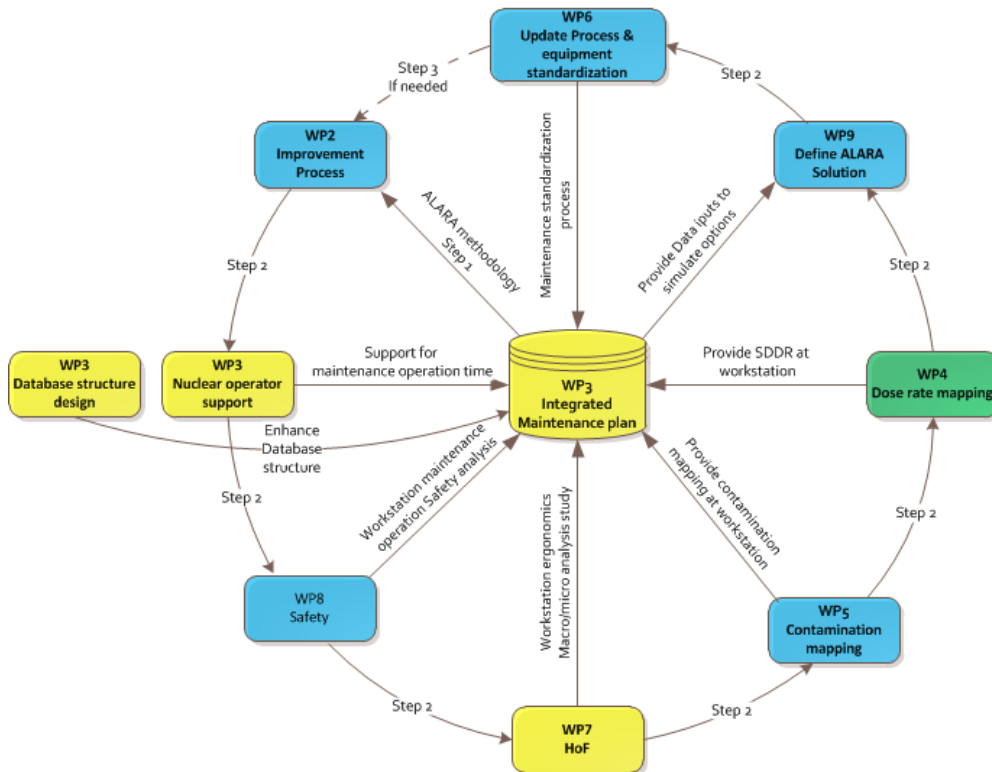
LEMER PAX  
PROTECTING LIFE



# 4 – Démarche d'ingénierie de radioprotection

## Exemple 2 : Démarche ALARA intégrée

- Via un contrat d'ingénierie multi-métiers mis en place d'une démarche ALARA formalisée



### Approche:

- Pousser et formaliser la démarche ALARA (ALARA workshops, Formalisation de « Dose Reduction Measures », itération avec la Dose collective)
- Approche par zones et non par systèmes (futur opérateur + vision sur-système)
- Intégrer le REX opérateur nucléaire
- Dossier d'ingénierie de radioprotection pour alimenter les dossiers de sûreté (mise à jour RPrS)

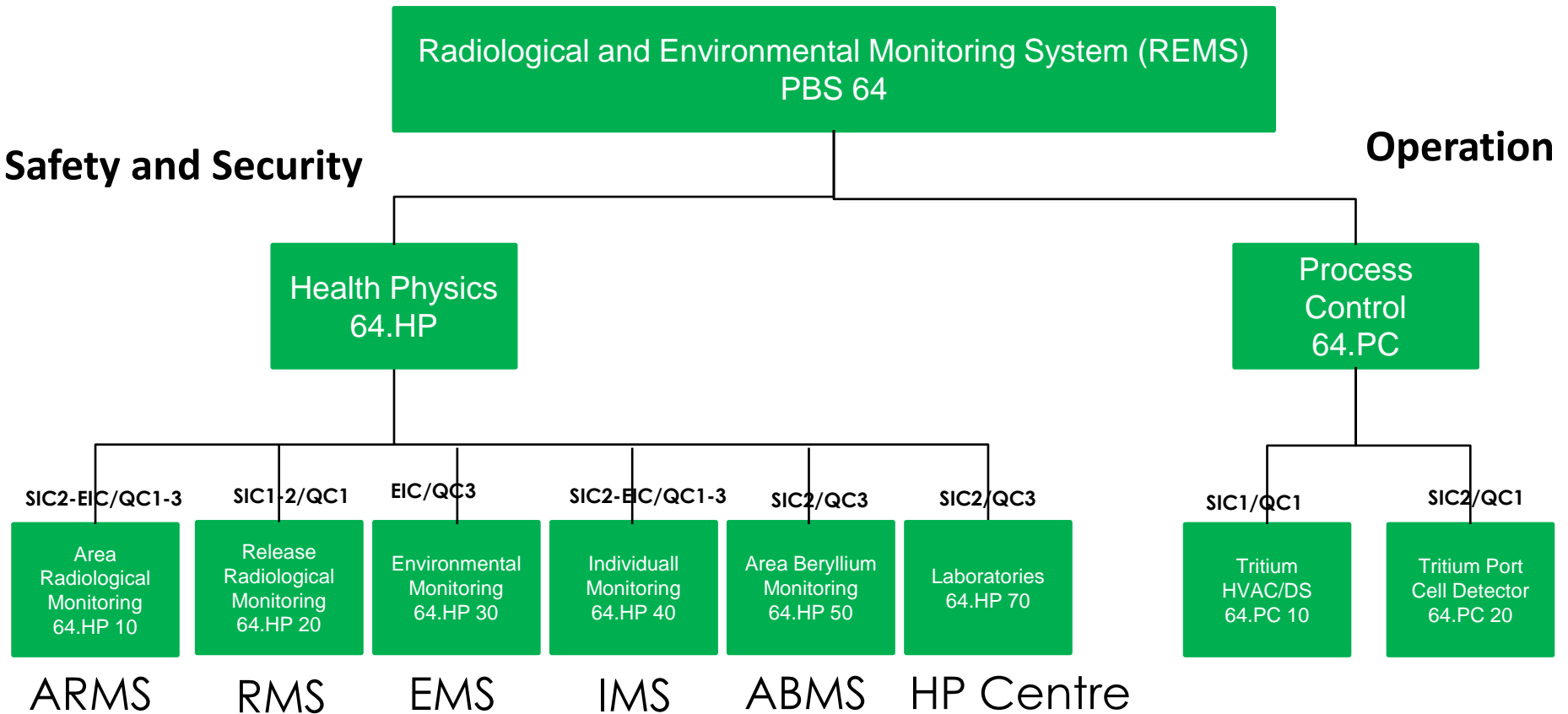
## 5 – Systeme de surveillance de la radioprotection

- Système appelé **REMS** « **Radiological & Environment Monitoring Systems** »
  - **Surveillance pour les travailleurs**
  - **Surveillance pour le public et l'environnement**
  - **Risque toxique (Béryllium) inclus**
- Contacts: IO ([Ian.Bonnett@iter.org](mailto:Ian.Bonnett@iter.org)) ou F4E ([Giovanni.Piazza@f4e.europa.eu](mailto:Giovanni.Piazza@f4e.europa.eu)). **F4E est en charge de ce système**
- Périmètre de ce système : (appareil de détection + architecture)
  1. Surveillance de zones (zonage radiologique)
  2. Surveillance aux postes de travail et efficacité du confinement
  3. Détection d'incidents/accidents radiologiques
  4. Alertes locales ou au niveau de l'installation
  5. Collecte, enregistrement et supervision des données radiologiques des bâtiments
  6. Surveillance de zones (risque Béryllium)
  7. Surveillance et enregistrement dosimétrie personnel, entrée/sortie de zones
  8. Dosimétrie individuelle
  9. Surveillance de l'environnement
  10. Surveillance des émissaires de rejets
  11. Surveillance et enregistrement des matières radioactives entrée/sortie site

# 5 – Systeme de surveillance de la radioprotection

Les fonctions de REMS sont assurées par des moyens stationnaires, mobiles ou portables, par des prises d'échantillons et laboratoire d'analyse

Architecture du systeme REMS





## 5 – Systeme de surveillance de la radioprotection

**Équipement:** Systèmes de surveillance radiologique pour les travailleurs et l'environnement disponible sur le marché adaptés et qualifiés ; détecteurs tritium spécifiques.

**Fonctions:** Assurer la surveillance sanitaire et radiologique des travailleurs et la surveillance environnementale du public.

**Plan d'approvisionnement :** La plupart des composants sont des articles du commerce, mais certains peuvent nécessiter une qualification (sismique, électromagnétique...) pour répondre aux exigences d'ITER. Les achats sont décomposés en phases : Conception (préliminaire et finale), qualification puis fabrication, installation sur site et tests.

**Compétences requises :** Conception et installation de systèmes de surveillance à usage nucléaire (Tritium !). Expérience en sécurité radiologique et environnementale. Intégration système (électronique, logiciel).

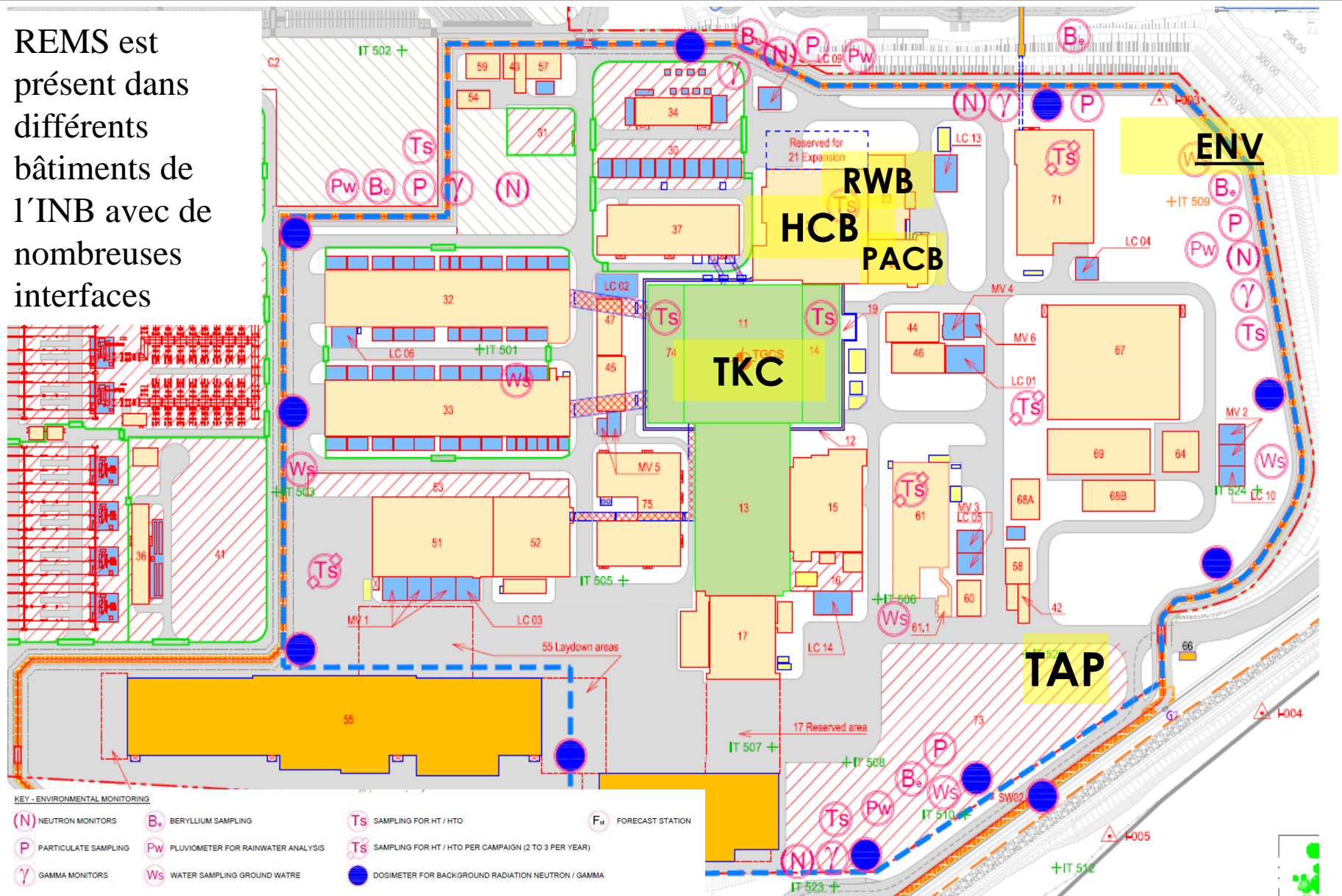
### Niveau de maturité :

- Tokamak :
  - PDR (06/2017): ARMS, ABMS, RMS, IMS, EMS, PC (Tokamak complex + environment)
  - FDR REMS en preparation pour le Tokamak
- TAPB (Building accueillant le beryllium) : PDR (12/2021) pour ARMS
- “First plasma REMS”: marché passé avec JACOBS pour la FDR et la fourniture/installation
- Hot Cell : PDR en cours

*PDR = Preliminary Design Review / FDR: Final Design Review*

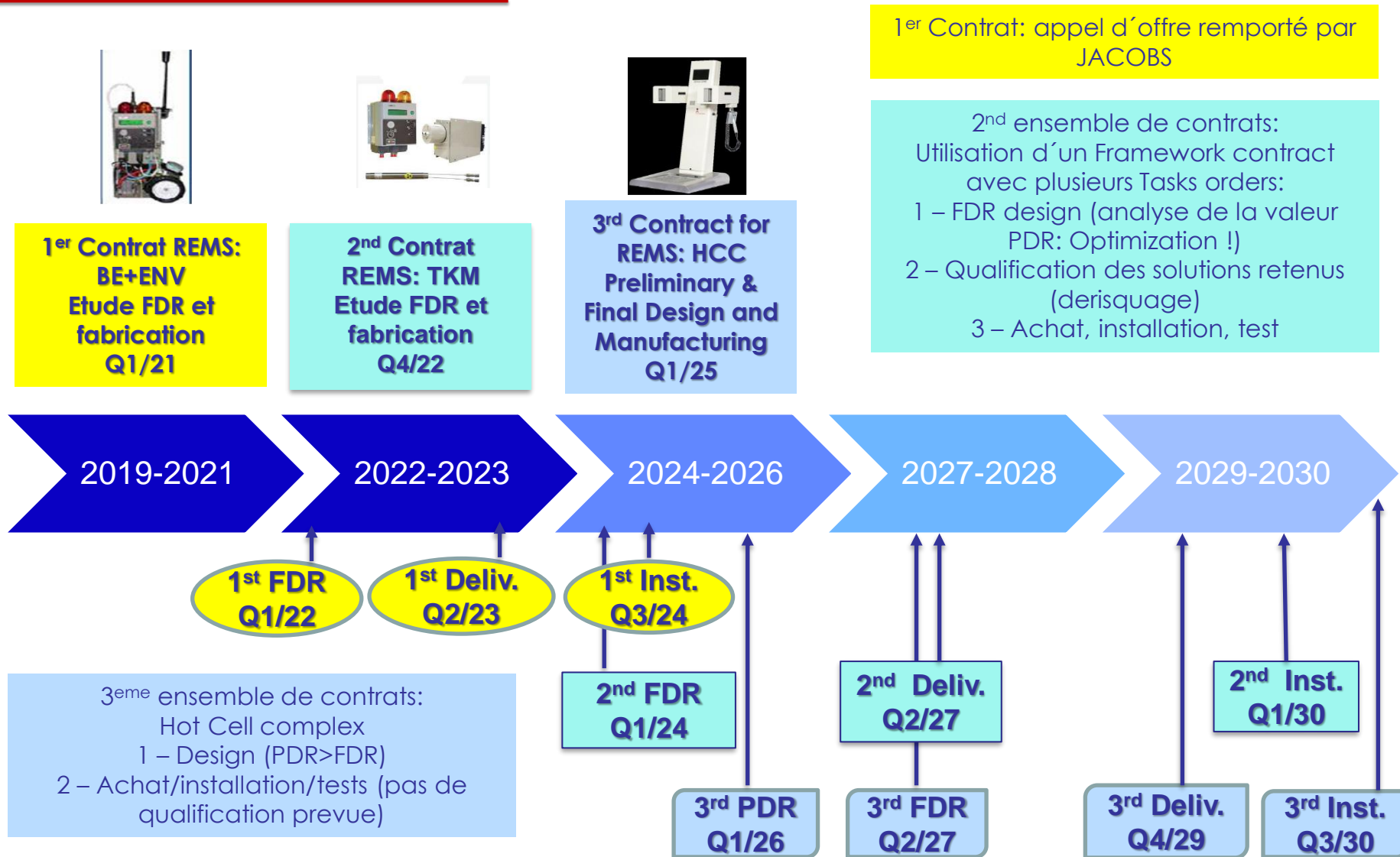
# 5 – Systeme de surveillance de la radioprotection

REMS est présent dans différents bâtiments de l'INB avec de nombreuses interfaces



# 5 – Systeme de surveillance de la radioprotection

## Contracts timeline 2019-2030





# 5 – Systeme de surveillance de la radioprotection

## Evaluation des besoins (exemple)

### ARMS

**Stationary** radiation monitoring inside the rooms of ITER facility

- **88**  $\gamma$ -dose rate monitors
- **14** n-dose rate monitors
- **69** T in air monitors
- **33** T in air samplers
- **3** C-14 air samplers
- **9** Part. air monitors
- **14** Part. Air samplers
- **11** Rad. Gas monitors
- **128** signaling units

### Process Control

**Stationary** monitoring of:

- Tritium HVAC/DS
- Tritium Port Cell Detector

- **274** T monitors
- **46** Logic modules 2/3
- **388** sampling & outlet lines (20 m each)

### ABMS

**Stationary** Be monitoring inside the rooms of ITER facility

- **19** Be air samplers
- **38** sampling & outlet lines (20 m each)

Evaluation des besoins sur la base de PDR.

### Nécessité d'une OPTIMISATION (objectif des FDR)

Attention: Besoin de qualification des capteurs tritium & neutrons

Enjeux associés a la qualification de champs magnétiques (50 a 100mT) : Customisation, relocalisation, blindages locaux (objectifs des études FDR)

### RMS

**Stationary** monitoring of:

- **Gaseous effluents** at releases (radiological and Be)
- **Liquid effluents** prior to discharge

- **6** T monitors
- **4** Rad. particulate monitor and samplers
- **4** Gas monitors
- **2** Gas monitors
- **2** Sampling lines with isolation valves (35 m each)
- **1** T sampler (bubbler)
- **1** C-14 sampler (bubbler)
- **1** Beryllium sampler
- **2**  $\gamma$ -detectors viewing liquid waste transfers to CEA

## 6 – Conclusion

- ITER est une INB avec plusieurs bâtiments nucléaires. C'est une machine fonctionnant en régime pulsé avec 3 modes de fonctionnement
- Chaque mode de fonctionnement présente des enjeux de radioprotection différents
- Les enjeux de radioprotection vont progressivement monter en importance avec la mise en œuvre du programme expérimental.
- ITER en fonctionnement nominal présente des sources radiologiques spécifiques: neutrons de 14 MeV, gammas de 6 MeV, qui nécessitent des développements de codes de transports radiatifs et le déploiement de matériaux spécifiques de radioprotection
- ITER présente des enjeux de radioprotection associés aux risques de contamination (Tritium, poussière activée, ACP)
- ITER met en place une démarche ALARA importante eu égard aux enjeux de radioprotection en maintenance
- ITER nécessitera un système de surveillance et de détection de la radioprotection important avec de nombreux équipements fixes, mobiles dans des environnements contraints (nombreux contrats à venir avec développement spécifiques)



china eu india japan korea

Merci pour votre attention

