

# Exemples de conception parasismique et de qualification sismique des composants d'ITER

Didier COMBESCURE<sup>1</sup>, Gaston HANNA<sup>2</sup>, Fernando RUEDA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fusion for Energy, ITER Delivery, Barcelona, [didier.combescure@f4e.europa.eu](mailto:didier.combescure@f4e.europa.eu)

<sup>2</sup> Fusion for Energy, ITER Delivery, Cadarache, [gaston.hanna@f4e.europa.eu](mailto:gaston.hanna@f4e.europa.eu)

<sup>3</sup> Esteyco, Madrid, [Fernando.rueda@esteyco.com](mailto:Fernando.rueda@esteyco.com)

**RESUME** Les exigences sismiques sont l'un des aspects clés auxquels il faut faire face dans la conception d'une installation nucléaire. Certaines singularités de l'installation de fusion ITER rendent les exigences sismiques particulièrement critiques et/ou non conventionnelles dans de nombreux cas. F4E a travaillé sur la mise en œuvre de ces exigences pour un certain nombre de systèmes et sous différents angles avec différents fournisseurs, notamment des PME et des bureaux ou groupes d'études hautement spécialisés. Un effort a également été fait pour assurer une expertise technique suffisante disponible dans le projet en favorisant la participation des fournisseurs aux groupes de travail normatifs et de référence internationaux de l'OCDE. Cet article montrera plusieurs exemples de calculs et de qualification. Des calculs sismiques non linéaires avec décollement du Tokamak ainsi que les calculs de retrait pour expliquer le décollement de quelques patins antisismiques du bâtiment principal seront présentés. Des exemples de justification de composants mécaniques en composite (support d'un système d'alimentation électrique) et d'un pont roulant compléteront le panorama.

**Mots-clefs** Calculs sismiques, Non linéaire, Isolation sismique, Structure composite, Pont roulant.

## I. INTRODUCTION

Les exigences sismiques sont l'un des aspects clés auxquels il faut faire face dans la conception d'une installation nucléaire. Certaines singularités de l'installation de fusion ITER rendent les exigences sismiques particulièrement critiques et non conventionnelles dans de nombreux cas. F4E a travaillé sur la mise en œuvre de ces exigences pour un certain nombre de systèmes et sous différents angles avec différents fournisseurs, notamment des PME et des bureaux ou groupes d'études hautement spécialisés. Un effort a également été fait pour assurer une expertise technique suffisante disponible dans le projet en favorisant la participation des fournisseurs aux groupes de travail normatifs et de référence internationaux de l'OCDE.

Cet article montrera plusieurs exemples de calculs et de qualification.

## II. PRESENTATION GENERALE DE ITER

Dans le sud de la France, 35 pays collaborent pour construire le plus grand tokamak du monde, un dispositif de fusion magnétique qui a été conçu pour prouver la faisabilité de la fusion en tant que source d'énergie à grande échelle et sans carbone basée sur le même principe qui alimente notre Soleil et étoiles. La campagne expérimentale qui sera menée à ITER est cruciale pour faire avancer la science de la fusion et préparer la voie aux centrales à fusion de demain. L'objectif principal d'ITER est l'étude et la démonstration des plasmas brûlants, des plasmas dans lesquels l'énergie des noyaux d'hélium produits par les réactions de fusion est suffisante pour maintenir la température du plasma, réduisant ou éliminant ainsi le besoin de chauffage externe. ITER testera également la disponibilité et l'intégration de technologies essentielles pour un réacteur à fusion (telles que les aimants supraconducteurs, la maintenance à distance et les systèmes d'extraction de puissance du plasma) et la validité des concepts de modules de génération de tritium qui conduiraient dans un futur réacteur au tritium autosuffisance [1].

Des milliers d'ingénieurs et de scientifiques ont contribué à la conception d'ITER depuis que l'idée d'une expérience conjointe internationale sur la fusion a été lancée en 1985. Les membres d'ITER—Chine, Union européenne, Inde, Japon, Corée, Russie et États-Unis— sont maintenant engagés dans une collaboration de 35 ans pour construire et exploiter le dispositif expérimental ITER, et ensemble amener la fusion au point où un réacteur de fusion de démonstration peut être conçu.

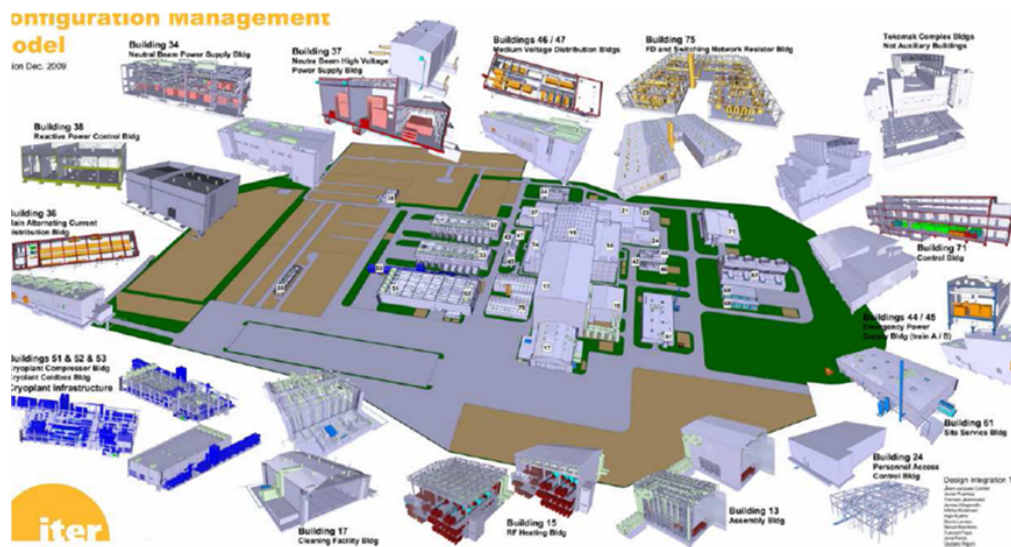


FIGURE 1. Vue de l'installation ITER

L'installation ITER est constituée d'un grand nombre de bâtiments et de systèmes complexes tels que l'isolation sismique du complexe Tokamak supportant la machine Tokamak complexe et connecté à d'autres bâtiments (Figure 1). Plusieurs normes nucléaires et non nucléaires sont utilisées pour concevoir, justifier et qualifier les composants. Plusieurs types de composants (par exemple, les composants cryogéniques et sous vide) ou certaines charges spécifiques (telles que les charges électromagnétiques ou la fuite de matière cryogénique) ne sont pas couverts par les codes & normes nucléaires de fission et nécessitent un effort spécifique pour consolider les

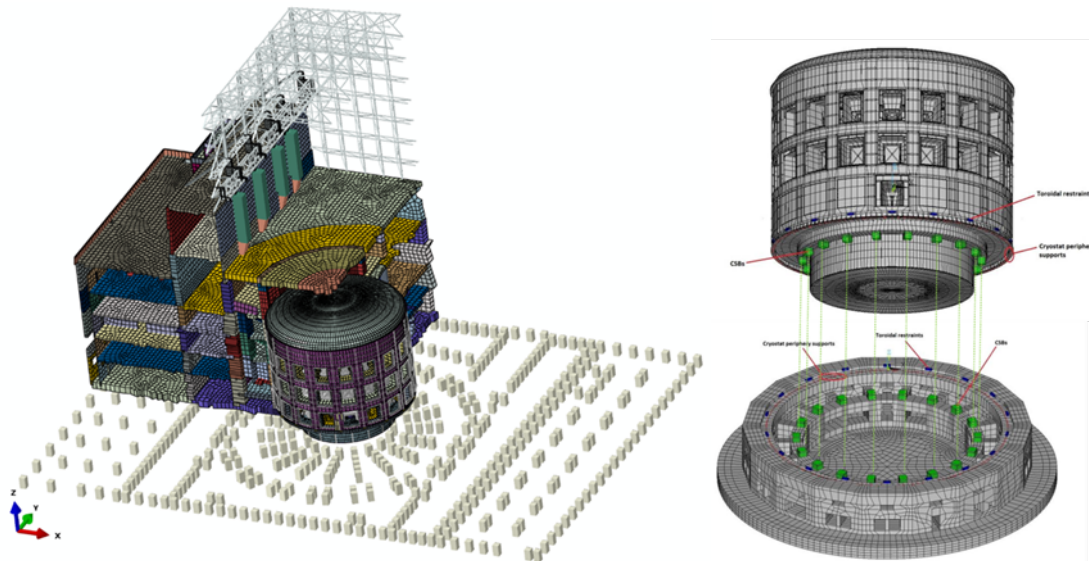
enseignements appris d'ITER et assurer la faisabilité de la prochaine génération de réacteurs Fusion [2].

### III. ACTIVITES DE CONCEPTION ET DE JUSTIFICATION

Des modèles linéaires et non linéaires ont été utilisés pour déterminer les charges sismiques et pour justifier des composants critiques tels que la couronne en béton armé du complexe tokamak. Les principaux résultats des modèles globaux du complexe Tokamak et des Cellules Chaudes (Hot Cell Facility) déjà présentés lors de plusieurs conférences seront rappelés. Les autres exemples qui seront présentés couvriront divers aspects de la conception et de la justification de composants mécaniques en acier ou en composite tels que le monte-charge (Cargo Lift), les portes nucléaires, les supports de lignes cryogéniques flexibles et la structure du pont haute tension du système de chauffage par injection de faisceaux de neutres (High Voltage Deck). Non seulement des logiciels numériques FEA ou des feuilles de calcul, mais aussi des procédures expérimentales ont été utilisées.

#### A. Modélisation du bâtiment Tokamak

Le bâtiment Tokamak qui est sur isolateurs présente une complexité liée aux nombres d'équipements qu'il doit abriter. Plusieurs modèles de calcul ont été développés par l'Architecte Engineer responsable de son dimensionnement ainsi que par des bureaux d'études et des équipes internes au projet ITER pour déterminer des efforts d'interface ou contrôler les modèles de référence [3,4]. Un modèle complet avec une modélisation fine de la machine Tokamak est présenté sur la Figure 2.



**FIGURE 2 : Exemple de modèle global utilisé pour déterminer ou vérifier les efforts aux interfaces principales et spectres de plancher**

Une des difficultés rencontrées sur le projet est le contrôle de la configuration en raison du nombre d'équipements ainsi que des différences importantes de maturité de leur

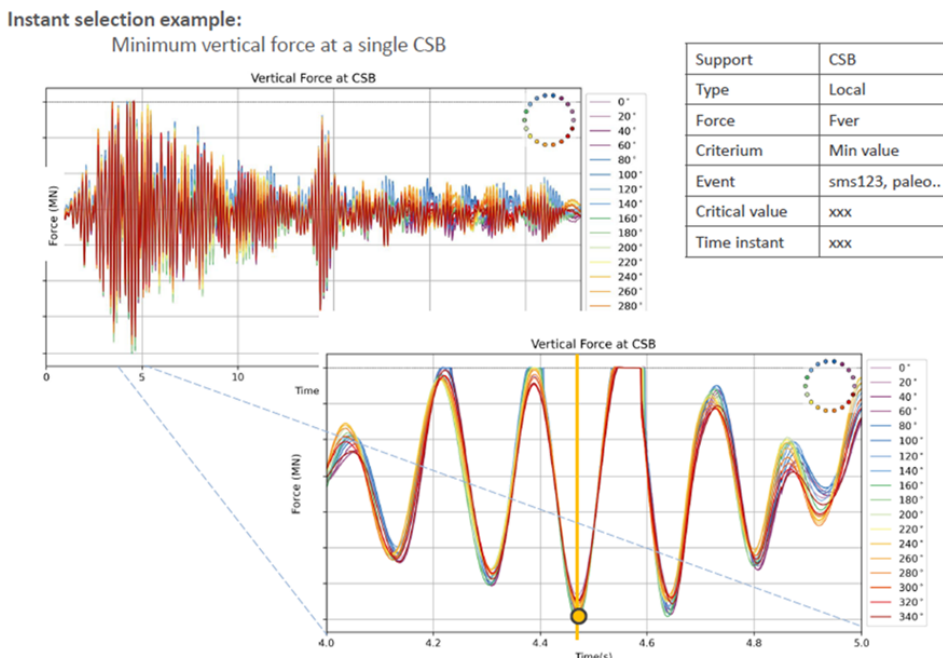
dimensionnement. La structure est aussi soumise a des chargements importants tel que les chargements sismiques ou des chargements représentatifs d'accident interne (perte de réfrigérant cryogénique par exemple). Les effets du retrait et du fluage du béton sont aussi assez importants en raison des dimensions du bâtiment.

Les modèles linéaires élastiques du bâtiment ont été utilisés pour justifier les principaux éléments porteurs (dalles, murs, poteaux, isolateurs, etc...) ainsi que pour générer les spectres de planchers en un millier de points dans le bâtiment [5].

*B. Prise en compte des non linéarités :*

Les non linéarités locales tel que les glissement et les décollements au niveau des interfaces entre la machine et le bâtiment ont été prises en compte avec le modèle visible sur la Figure 2. Les modèles élastiques du bâtiment et des composants de la machine ont fait l'objet d'une condensation dynamique en considérant les modes bloques ou libres ainsi que les modes statiques d'interface. Les non-linéarités ont été modélisées par des lois spécifiques. Les principales non linéarités peuvent se développer au niveau des supports de l'enceinte a vide (VV Gravity Support) ou des appuis glissants hémisphériques du cryostat (Cryostat Spherical Bearings) dont le rôle est de laisser la contraction du support de la machine libre en cas de fuite de liquide cryogéniques.

Des calculs temporels ont pu être réalisés avec des signaux représentatifs du séisme noyau dur (SND ou SL-3). Ces calculs ont pu montrer que, même si la machine peut décoller de ses supports glissants, les efforts générés lors de la reprise du contact restent limités en raison des vitesses d'impact faibles (Figure 3).



**FIGURE 3 : Exemple de résultats de calculs non linéaires – Forces locales au niveau des supports du cryostat**

C. Exemple de dimensionnement d'un composant mécanique :

Un des composants dont le dimensionnement est fortement influencé par le chargement sismique est l'interface entre le monte-charge (Cargo lift) et les chariots de transport (Cask) dont la charge peut varier de 20 à 80 tonnes (Figure 4). Les supports à cette interface doivent être assez souples pour limiter les efforts sismiques dans la direction vertical et, en même temps, s'adapter à des châteaux de transport pouvant avoir des masses très différentes (Figure 5). Une des difficultés est aussi liée aux différents niveaux de maturités des deux systèmes en interface : la fabrication du monte-charge a débuté alors que les châteaux de transport sont encore à un stade de conception préliminaire [6].

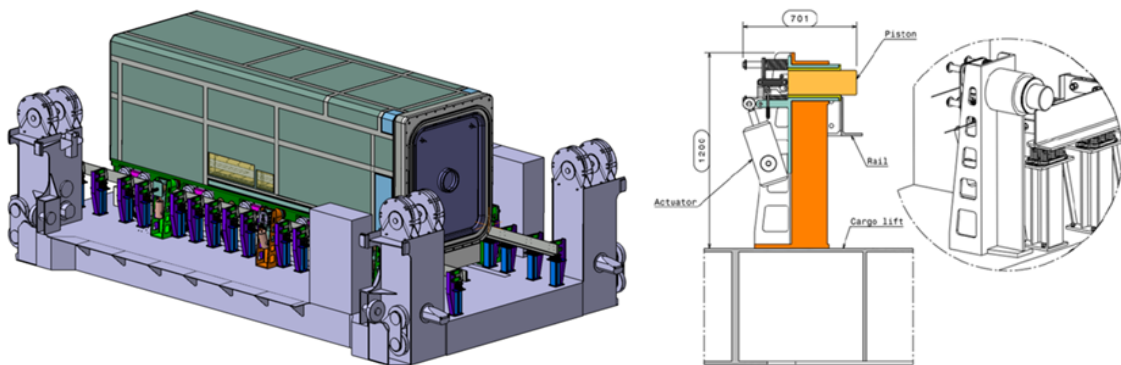


FIGURE 4 : Dimensionnement des supports et détermination de leur raideur pour limiter les efforts induits par un évènement sismique

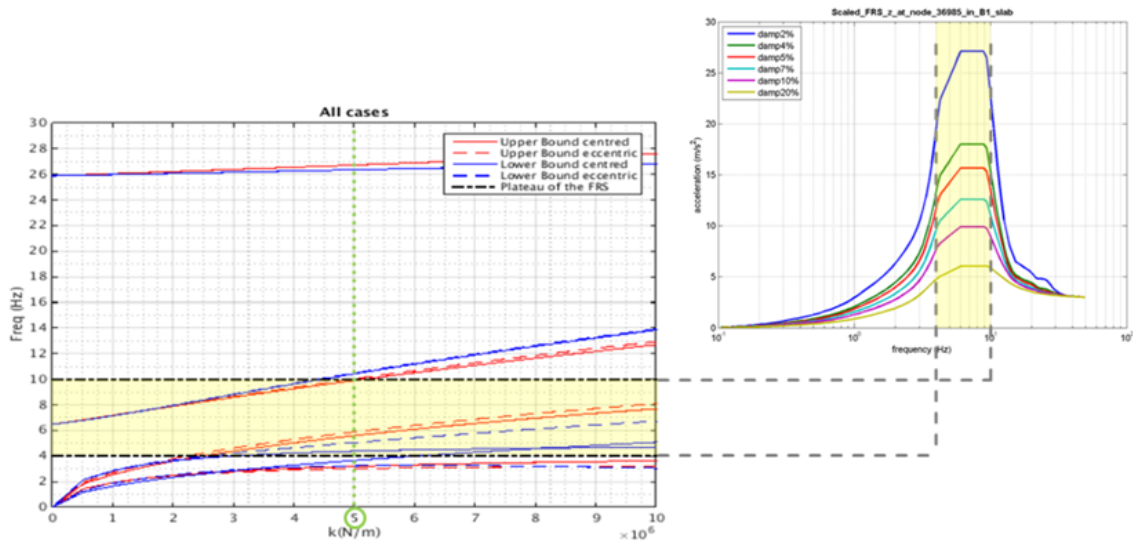


FIGURE 5 : Dimensionnement des supports et détermination de leur raideur pour limiter les efforts induits par un évènement sismique (direction vertical)

#### IV. PROPAGATION DES EXIGENCES SISMIQUES ET VERIFICATION INDEPENDANTE :

Le développement et la propagation des exigences sismiques sont principalement assurés par le cadre assurance qualité utilisé au sein de F4E et de ITER. Les exigences sismiques sont incluses dans les exigences générales d'analyse, de conception et de qualification et dans les directives techniques et des check-lists. Les études indépendantes peuvent aller d'une simple vérification des ordres de grandeurs à des études numériques effectuées avec des modèles indépendants ou des mesures expérimentales.

##### A. Exigences sismiques et contexte Assurance Qualité:

ITER s'appuie sur la notion de classe sismique pour propager les exigences sismiques associées à chaque structure et sous-structure. Les différentes classes sismiques sont données ci-après. Pour un équipement complexe ayant des exigences fonctionnelles après ou pendant un évènement sismique (SC1-SF), un travail important du concepteur de l'équipement est de propager les exigences sismiques à chaque composant (Figure 5). Les composants importants pour la sûreté (SIC-1 ou SIC-2) doivent être identifiés au cours de ce travail.

- SC1 (SF) - Classe sismique 1-SF : Stabilité structurelle et performances de sécurité sismique fonctionnelle requises maintenues en cas de tremblement de terre. La satisfaction de ce niveau d'exigence garantit le niveau de sécurité tout au long du fonctionnement normal de l'équipement. La fatigue n'est pas prise en compte.
- SC1 (S) - Classe sismique 1-S : stabilité structurelle maintenue en cas de séisme, c'est-à-dire pas de rupture de tuyauterie, pas d'effondrement de structures ou d'équipements, déformation plastique limitée, fissuration du béton limitée, fonctions de support structurel maintenues. Avec ce niveau d'exigence, il est possible qu'un petit niveau de déformation puisse se produire. Par conséquent, il pourrait être nécessaire d'inspecter l'équipement avant de le réutiliser.
- SC2 – Classe sismique 2 : non-endommagement des équipements SC1 ; absence de dommages aux équipements SC1 pour les bâtiments et ouvrages abritant et protégeant des SSC classés SIC, ou aux bâtiments pouvant potentiellement endommager de tels ouvrages en cas d'effondrement, pas d'autres exigences concernant les performances structurelles ou fonctionnelles en cas de séisme,
- NSC – Catégorie non sismique. Aucune exigence sismique pour la sûreté nucléaire. Cependant, tous les systèmes, structures et composants doivent satisfaire à l'exigence qu'il n'y ait aucune défaillance qui empêcherait un composant SIC-1 ou SIC-2 d'accomplir sa fonction de sûreté. Les exigences réglementaires françaises pour les bâtiments normaux s'appliquent.

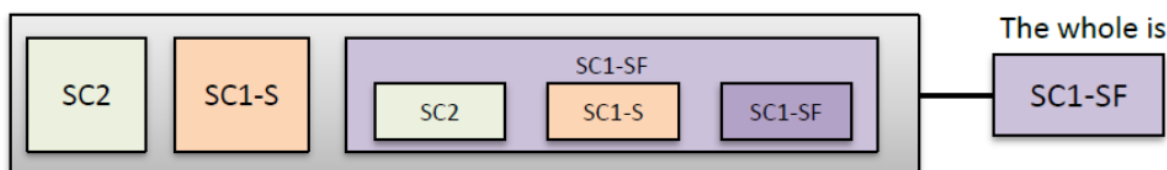


FIGURE 5 : Exemple de propagation de la classe sismique d'un composant SC1-SF

Les exigences portant sur les modélisations et les qualifications expérimentales sont principalement propagées par les documents QA-114 [7] et QA-113 [9] ainsi que les guides techniques associés [8]. Des exemples d'exigence du QA-114 sont donnés sur la Figure 6.

7.11.2 Mass and Surface Check (MSS)	
F4E-QA-114-TECH-MSS-01	When model mass is relevant for the physics analysed, a <b>mass budget check</b> (or volume check) and a <b>surface check</b> (for the main interfaces) shall be done to verify that the analysis model adequately represents the component analysed and reported.
7.11.4 Check of Reaction Forces (RFM)	
F4E-QA-114-TECH-RFM-01	It shall be checked whether the <b>balance of relevant analysis results magnitudes</b> (for instance, reactions on the boundaries and constraints in the form of forces or fluxes) of the analysis model correspond to what is expected. Summary tables with magnitude, sign, directions (as applicable) shall be provided for relevant load cases in order to verify that the intended loads are correctly applied. The distribution of loads and the load paths are to be checked for consistency too.
6.3. Calculation and Modelling Tools (CMT)	
F4E-QA-114-ANP-CMT-01	The Supplier <b>shall submit to F4E</b> for agreement, before the start of activities, the list of modelling tools (including all details - e.g., Finite Element method, Computational Fluid Dynamics,...) and calculation software to be used during the implementation of the contract, and seek to F4E acceptance. The Supplier shall only use <b>validated modelling tools and verified calculation software and only for the intended purpose</b> . The computer package shall be used in its intended and <b>validation domain</b> .

FIGURE 6 : Exemples d'exigence du QA-114

#### B. Exemple de vérification pour le système de régénération cryogénique

Le système de régénération cryogénique de ITER (Warm Regeneration System ou WRS) fournit de l'hélium gazeux chaud pour la régénération des cryopompes équipant le Torus, le Cryostat et le système de chauffage par injection de neutres (NBI). Le système comprend deux éléments principaux, la Warm Regeneration Box (WRB) et la Warm Regeneration Line (WRL) qui s'interfacent avec les douze Cold Valve Boxes (CVB) sur les cryopompes. Le WRL est constitué de deux lignes de transfert de gaz hélium indépendantes (circuits d'alimentation et de retour) acheminées du niveau L3 au niveau B1 par un puit. La structure de la ligne qui doit avoir une bonne capacité d'isolation thermique est relativement complexe (Figure 7).

Lors de la revue du premier dossier de calcul où la ligne était modélisée avec des éléments de tuyaux classiques, les échanges sur les caractéristiques mécaniques de la ligne ont mis en évidence l'absence de normes validant les raideurs utilisées. Des essais ont donc été effectués chez le fabricant (Cryotec, Chivasso, Italie) sur un tronçon de ligne dont les conditions aux limites (précharge axiale) ainsi que les pressions internes pouvaient être modifiées. Des mesures de déformées statiques et de modes propres ont été effectuées sur plusieurs configurations. Ces essais ont mis en évidence une forte variabilité de la raideur de la ligne. Une nouvelle note de justification sismique a donc été proposée en simplifiant fortement la méthodologie utilisée : les

supports de la ligne ont été vérifiées en appliquant, de façon statique, l'accélération spectrale maximale (plateau du spectre) à la masse de la ligne à la place du calcul spectral initial.

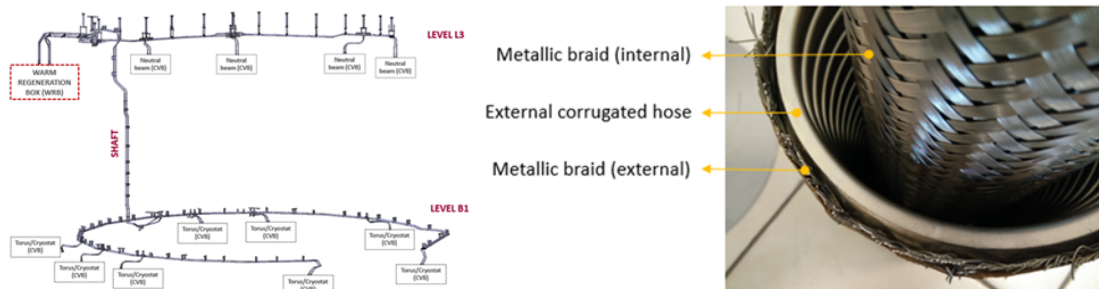


FIGURE 7 : Vue générale et détail du système de régénération cryogénique de ITER (WRS)

### C. Exemple d'utilisation d'essais in-situ

Le second exemple de vérification de note de calcul sismique concerne la structure de la cage de Faraday du système de chauffage par injection de neutre (Neutral Beam Injector). En raison du fort voltage (1 MV), la structure de 2 étages supportant plusieurs tonnes de matériel électrique est supportée par des tubes en composite similaires à ceux utilisés dans les lignes à très haute tension (Figure 8). Un prototype de ce type de chauffage avec ses systèmes électriques a déjà été construit à Padoue, Italie. Avant la livraison à l'exploitant, des essais in-situ statique et dynamique ont été réalisés pour s'assurer de l'adéquation entre le modèle de calcul et la structure réelle (Figure 9). La structure est assez souple (mode fondamental à 1.25 Hz). Les résultats de l'analyse modale à bas niveaux de vibration ont été rajoutés au dossier de justification qui comporte des essais à la rupture sur des tubes similaires soumis à des chargements transverses. Il faut noter que ce type de structure en composite n'est actuellement pas couvert par une norme structurelle (mais seulement par un projet de norme en cours d'élaboration). Pour Cadarache, en raison de la masse et des dimensions de ces cages de Faraday, la structure a été vérifiée au niveau de séisme SL-2 et pas à l'Eurocode 8.

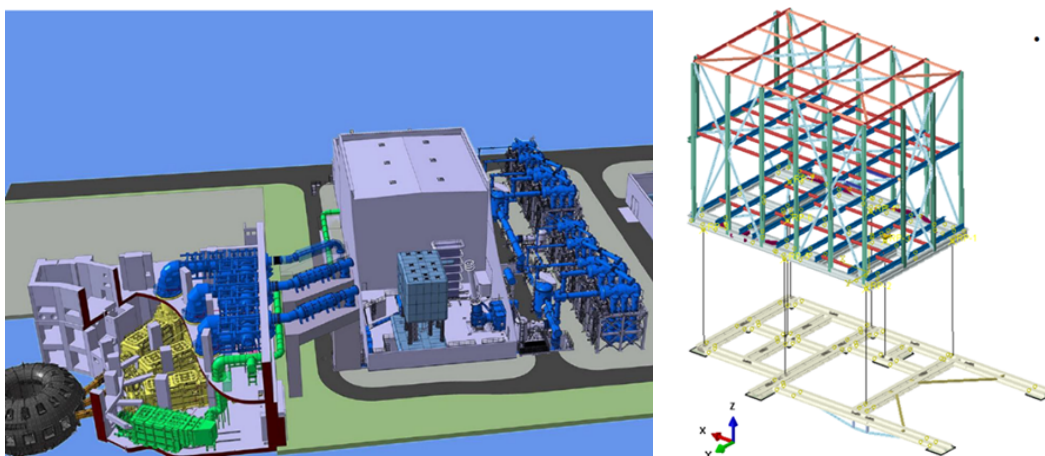


FIGURE 8 : Vue du système de chauffage par injection de neutre et modèle éléments finis de la structure supportant les des équipements électriques

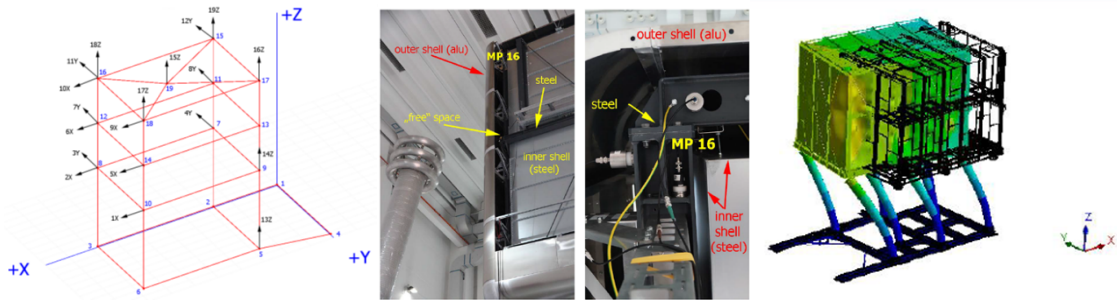


FIGURE 9: Analyse modale expérimentale et numérique de la structure (mode fondamental à 1.25Hz)

D. A propos de la validation des modèles de calcul complexes

ITER, comme de nombreux projets nucléaires, a recours à des modèles de calcul non linéaires et la question de leur validation se pose. Les calculateurs doivent aussi posséder assez de recul face à ce type de modélisation plus difficile à interpréter et donc à vérifier que les modèles linéaires élastiques. F4E a soutenu plusieurs fournisseurs dans leur participation à des benchmarks internationaux organisés par l'OCDE [10]. C'est le cas du Benchmark SOCRAT sur le comportement sismique des ponts roulants. La Figure 10 montre deux modèles de calcul non linéaires, l'un utilisé pour la justification du système de maintenance dans la Cellule Chaude d'Injection de neutres, l'autre utilisé lors de la participation au Benchmark SOCRAT.

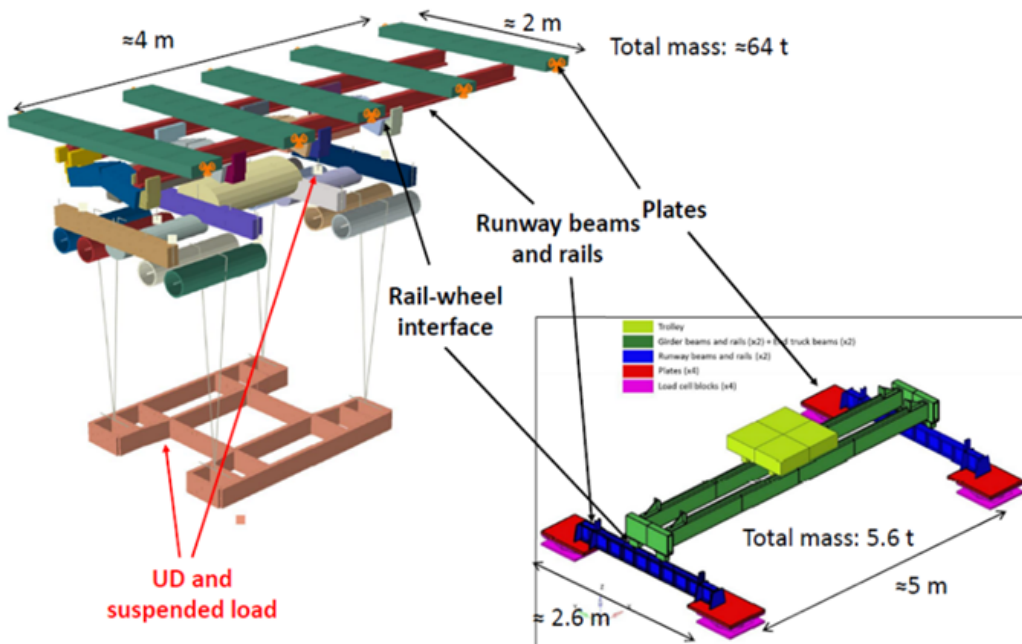


FIGURE 9: Exemples de modèle de pont roulant. Système de maintenance de ITER et benchmark SOCRAT

#### IV. CONCLUSIONS

Cet article a présenté plusieurs exemples de calculs linéaires et non linéaires ainsi que d'essais effectués dans le cadre de revue de notes sismiques du projet ITER. La façon dont sont propagées les exigences sismiques a été décrite brièvement. Ceci a été complété par un exemple de participation à un Benchmark pour s'assurer de la qualité des modèles non-linéaires utilisés sur le projet. Ces différents exemples montrent diverses facettes de la propagation des exigences sismiques. Le développement et le maintien de l'expertise dans un contexte de contrôle des coûts nécessitent l'utilisation techniques nouvelles comme les mesures in-situ et de capitalisation de l'expérience via la participation aux comités normatifs et à des exercices collectifs tel que les benchmark expérimentaux.

#### REFERENCES

- [1] ITER Website, <https://www.iter.org/construction/construction>
- [2] Rueda F. (2021), Nuclear Fusion. Building Today the Energy of Tomorrow, Esteyco Foundation. ([https://www.esteyco.com/wp-content/uploads/2021/12/NUCLEAR-FUSION\\_BJ\\_web.pdf](https://www.esteyco.com/wp-content/uploads/2021/12/NUCLEAR-FUSION_BJ_web.pdf) )
- [3] Combescure D., Ayneto J., Rueda F., Maqueda L., Moya L., Olalde J., Domínguez V., Zhang X., Schioler T., Sannazzaro G. and Patisson, L. (2017), Seismic Analysis of the Tokamak Complex Building of ITER Fusion Facility, *SMiRT-24, Busan, Korea*.
- [4] Rueda F., Maqueda L., Moya L., Combescure D., Olalde J., Dominguez V., (2017), An overview on the seismic response of the ITER Tokamak Complex, *VII Conference ACHE, La Coruna, Spain*.
- [5] Ezeberry J. and Combescure D. (2015), A direct method for determining floor response spectra at the ITER Tokamak Complex, *SMiRT-23, Manchester, United Kingdom*.
- [6] Moya L., Alonso D., Rueda F., Combescure D., Ayneto J. and Locke D. (2017), A proposal for the interface between the cargo-lift conveyance platform and the transportation cask of ITER Facility Design and Seismic Analysis, *SMiRT-24, Busan, Korea*.
- [7] QA-114, F4E Instructions for Suppliers Performing Design Analysis, v.4.0 (F4E\_D\_22FR5T)
- [8] Guidelines for seismic design, analysis and qualification of complex industrial and nuclear facilities against seismic hazard (F4E\_D\_26R65J)
- [9] QA-113, F4E Supplier Nuclear Safety Management Requirements, v2.1 (F4E\_D\_22JRQY)
- [10] Ezeberry J., Combescure D. and Ayneto J., (2019), Impact Assessment of ITER Reinforced Concrete Structures – 3rd Phase of the OECD-IRIS Benchmark, *SMiRT-25, Charlotte, NC, USA*.