

Email, Letter, Confirmation, Dialog Sheet

Exclusion de la Chambre à Vide d'ITER des Dispositions de la Section 9 de l'Article R.557 du Code de l'Environnement

Conformément au Code de l'Environnement français notamment son article R557-9 concernant les Équipements Sous Pression (ESP), certains équipements pourront être déclarés comme n'étant pas soumis aux dispositions de cet article, et par conséquent ne sont pas soumis aux dispositions de l'Arrêté du 30/12/2015 relatif aux Équipements Sous Pression nucléaires.

Ce document constitue la justification de l'exploitant, l'Organisation Internationale ITER, pour la Chambre à Vide d'ITER.

<i>Approval Process</i>			
	<i>Name</i>	<i>Action</i>	<i>Job Title / Affiliation</i>
<i>Author</i>	Martinez J.- M.	03 Mar 2025:signed	Project Leader
<i>Co-Authors</i>			
<i>Reviewers</i>	Jourdan T.	03 Mar 2025:recommended (Typo Correction)	Nuclear Pressure Equipment Coordina...
<i>Previous Versions Reviews</i>	Lioce D.	24 Feb 2025:recommended (Short Cycle) v1.1	IO/DG/CP/TKP
	Seropian C.	24 Feb 2025:recommended (Short Cycle) v1.1	IO/DG/ESD/NSE
	Bonito Oliva A.	24 Feb 2025:recommended v1.0	IO/DG/CP/TKP
	Orlandi S.	21 Feb 2025:recommended v1.0	IO/DG/CP
<i>Approver</i>	Perrier G.	03 Mar 2025:approved	Head of Department
<i>Information Protection Level: Non-Public - Unclassified</i>			
<i>RO: Martinez Jean-Marc</i>			
<i>Read Access</i>	LG: DA heads, LG: Lessons learned, LG: others, LG: PE Group, LG: Deputy Head of Dept - SD, GG: Safety, AD: ITER, AD: IO_Director-General, AD: OBS - Nuclear Licensing and Oversight Section (NLO), AD: OBS - Nuclear Licensing and Oversight Section (NLO) - EXT, AD: Nuclear Safety Inspectors, AD: DA-US, ...		

#drn#

<i>Change Log</i>			
Exclusion de la Chambre à Vide d'ITER des Dispositions de la Section 9 de l'Article R.557 du Code de l'Environnement (CXSWKL)			
<i>Version</i>	<i>Latest Status</i>	<i>Issue Date</i>	<i>Description of Change</i>
v1.0	Signed	21 Feb 2025	
v1.1	Revision Required	24 Feb 2025	- Température minimale d'étuvage fixée à 180C. - Acronymes en anglais ajoutés au glossaire. - Correction des erreurs de frappe. - Minimum baking temperature fixed at 180C. - English acronyms added on glossary. - Misprints/typos correction
v1.2	Signed	03 Mar 2025	Corrections de format, d'orthographe et de grammaire en français.
v1.3	Approved	03 Mar 2025	Correction grammaticale mineure.

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	2
2	GLOSSAIRE	3
3	RÉFÉRENCES.....	4
4	OBJECTIFS	4
5	CONCEPTION DE LA CHAMBRE À VIDE D'ITER ET SES PRINCIPALES FONCTIONS.....	5
6	DIMENSIONNEMENT DE LA CHAMBRE À VIDE NON RÉGI PAR DES CHARGES DE PRESSION	6
7	RÉSUMÉ ET CONCLUSION	9
	ANNEXE 1.....	10
	ANNEXE 2.....	11
	ANNEXE 3.....	12

1 Introduction

Conformément à l'article 14 de l'accord établissant l'Organisation Internationale pour l'énergie de fusion ITER, *"l'Organisation ITER respecte les lois et réglementations nationales applicables de l'État hôte dans les domaines de la santé et de la sécurité publiques, de l'hygiène et la sécurité au travail, de la sûreté nucléaire, de la radioprotection, du régime des autorisations, des substances nucléaires, de la protection de l'environnement et de la protection contre les actes de malveillance"*.

Conformément à l'article R.557-9.2 du Code de l'Environnement [R1], concernant les équipements sous pression, certains équipements peuvent être déclarés comme n'étant pas soumis aux dispositions de la section 9 et plus particulièrement à l'article R557-9-2 j) du Code de l'Environnement :

" Équipements comportant des carters ou des mécanismes dont le dimensionnement, le choix des matériaux, les règles de construction reposent essentiellement sur des critères de résistance, de rigidité et de stabilité à l'égard des sollicitations statiques et dynamiques en service ou à l'égard d'autres caractéristiques liées à leur fonctionnement et pour lesquels la pression ne constitue pas un facteur significatif au niveau de la conception ; ces équipements peuvent comprendre :

(i) les moteurs, y compris les turbines et les moteurs à combustion interne ;

(ii) les machines à vapeur, les turbines à gaz ou à vapeur, les turbogénérateurs, les compresseurs, les pompes et les servocommandes;".

En 2009, la chambre à vide (VV) d'ITER a été classée comme équipement sous pression nucléaire (ESPN) de catégorie IV, niveau N2, sur la base d'une proposition de l'Organisation ITER (IO). Cependant, IO considère aujourd'hui que cette classification, bien que probablement considérée comme pragmatique à cette période pour aligner le projet ITER sur un cadre existant, n'était pas tout à fait appropriée. En effet, les règles utilisées n'étaient pas, et ne sont toujours pas, totalement adaptées à un composant principalement dimensionné en raison de brèves charges électromagnétiques (EM) pulsées plutôt que des pressions cinétiques statiques, qui définissent généralement les équipements sous pression.

L'objectif de ce document est de justifier que la "chambre à vide" n'est pas soumise aux dispositions de la section 9 de l'article R.557 du Code de l'Environnement Français.

2 Glossaire

Les acronymes utilisés dans le présent document sont énumérés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Glossaire

α	Ratio des admissibles RCC-MR, α = admissible (Cat.II) / admissible (Cat.III)
bar abs	Unité de pression : bar absolu
B_{tor}	Champ magnétique toroïdal
CP	Pression du liquide de refroidissement <i>Coolant Pressure</i>
d	Épaisseur de la coque de la structure VV
DA	Agence nationale (CN = République populaire de Chine, UE = Communauté européenne, IN = République de l'Inde, JA = Japon, KO = République de Corée, RF = Fédération de Russie et US = États-Unis d'Amérique) <i>Domestic Agency</i>
DP	Pression de calcul (charge de pression maximale pendant l'opération d'étuvage) <i>Design Pressure</i>
DW	Poids propre <i>Dead Weight</i>
EM	Électromagnétique
F	Densité de force radiale agissant sur la structure VV
HC	Courant de halo (flux de halo d'un plasma à la suite d'une phase de disjonction) <i>Halo Current</i>
IO	Organisation ITER <i>ITER Organization</i>
IDeA	Autorité de conception du projet ITER <i>ITER Design Authority Board</i>
J_{pol}	Composante poloïdale de la densité de courant du halo interceptée par la structure
MHD	Magnétohydrodynamique
ESPN	Equipements Sous Pression Nucléaire
Pmax	Pression maximale
VDE	Evènement de déplacement vertical <i>Vertical Displacement Event</i>
VDEIII(SD)	Evènement de déplacement vertical de Catégorie III type Lent vers le bas <i>Category III Vertical Displacement Event – Type Slow downward</i>
VV	Chambre à vide <i>Vacuum Vessel</i>
VV PHTS	Circuit primaire de refroidissement de la chambre à vide <i>Vacuum Vessel Primary Heat Transfer System</i>
VV PSS	Système de suppression de la pression de la chambre à vide <i>Vacuum Vessel Pressure Suppression System</i>

3 Références

- [R1] Code de l'Environnement Français Articles L.557-1 à 61 et R.557-1-1 à R.557.14-8
- [R2] Arrêté ministériel du 30 décembre 2015 modifié le 03 septembre 2018 relatif aux équipements sous pression nucléaires et à certains accessoires de sécurité destinés à leur protection.
- [R3] Directive 2014/68/UE du 15 mai 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression - FR ([ITER_D_RZ6PAK](#))
- [R4] Guide pour l'exclusion / exemption d'équipement de la réglementation Française ([ITER_D_35SVBG v2.2](#))
- [R5] Spécification de charge de la chambre à vide ITER ([2F52JY v3.4](#))
- [R6] Rapport sur l'intégrité structurelle de la chambre à vide et des traversées d'ITER - Volume I: Rapport de contraintes ([2F73RX v5.3](#))
- [R7] [Mémoire] Justification de la conception de la chambre à vide d'ITER non régie par la charge de pression (conditions d'étuvage) ([CDXAH5 v1.0](#))
- [R8] Comité de l'IDeA-24-003 : Décision et Résumé des discussions ([CQBS3T](#)). Décision du comité de l'IDeA de définir les nouvelles conditions d'étuvage : réduction de la pression d'étuvage du VV-PHTS à 18 bar abs à l'entrée de la VV (plafonnée par un dispositif de décompression), avec une température maximale de l'eau associée de 180°C.

4 Objectifs

Les objectifs de ce document sont les suivants :

- décrire la chambre à vide (VV) d'ITER, les paramètres clés de sa conception et ses principales fonctions,
- clarifier les charges dimensionnantes pour la VV,
- démontrer que la conception de la VV n'est pas régie par les charges de pression,
- et donc de fournir la preuve que la VV n'est pas soumise aux dispositions de la section 9 de l'article R.557 du Code Français de l'Environnement [R1].

5 Conception de la chambre à vide d'ITER et ses principales fonctions

La chambre à vide d'ITER est un carter conçu pour garantir les conditions de vide nécessaires (dans la chambre du plasma et dans l'environnement du cryostat) afin d'accueillir un plasma et de résister aux charges électromagnétiques générées lors des instabilités du plasma. Ces charges sont des éléments clés de la conception de la chambre à vide.

Constituée d'une structure à double paroi en acier inoxydable (d'une épaisseur de 40 à 60mm), la VV entoure le plasma comme un tore avec un large diamètre de 19,4m pour une hauteur de 11,3m (respectivement 26m et 15m en incluant les traversées). Comme l'illustre la Figure 1, elle comporte une série de traversées supérieures, de traversées équatoriales et de traversées inférieures permettant d'accéder au chauffage du plasma, à l'alimentation en combustible, aux diagnostics et aux services nécessaires aux composants internes de la chambre plasma. Elle est soutenue directement par les traversées inférieures. L'espace entre les parois de la chambre à vide (enveloppes interne et externe) est rempli par un blindage interne entouré d'eau, voir Figure 3.

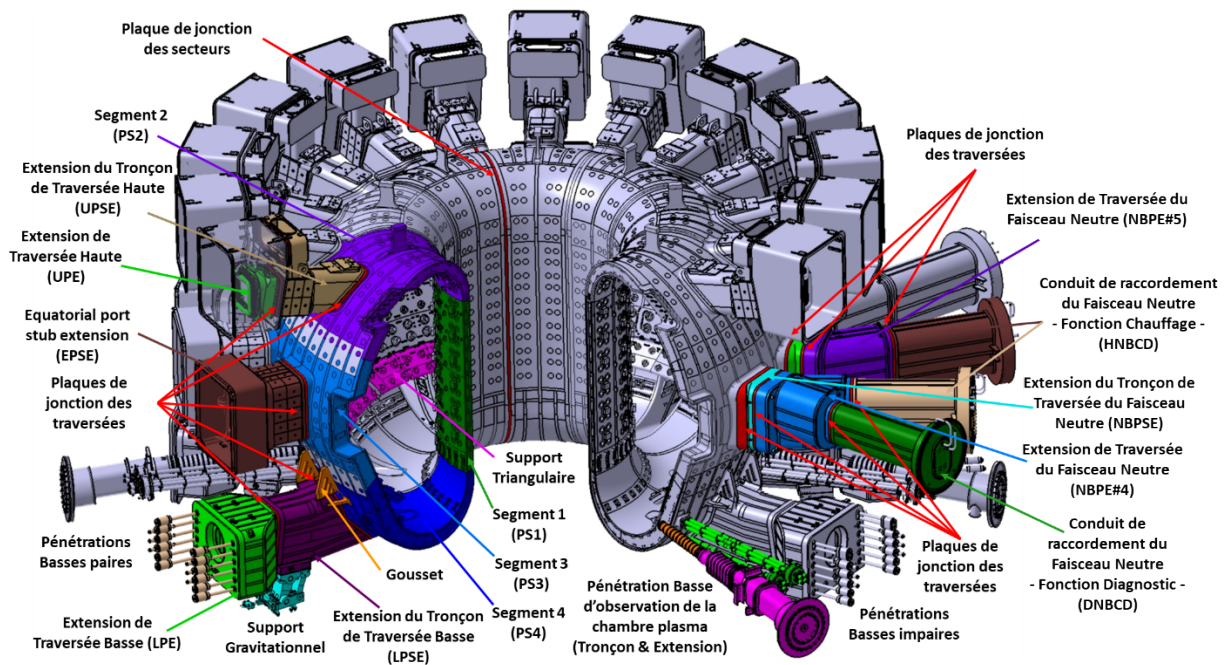


Figure 1 : Composants et sous-composants de la chambre à vide.

Globalement, les principales fonctions de la chambre à vide (VV) d'ITER sont les suivantes :

- Garantie des conditions d'ultravide nécessaires pour obtenir des décharges d'un plasma ;
- Stabilisation passive des instabilités magnétohydrodynamiques (MHD) du plasma, grâce à une enveloppe conductrice qui s'adapte parfaitement à ce dernier ;
- Supporter les charges gravitationnelles et électromagnétiques agissant sur la VV et tous les composants internes (principalement les modules de couverture et les divertors) dont la fonction est de servir de dissipateur thermique pour la majorité de l'énergie générée dans le plasma, et donc de contribuer au blindage nucléaire requis ;
- Pendant l'exploitation nucléaire, la VV assurera également une partie de la première barrière de confinement du tritium et des matériaux activés, et contribuera à protéger davantage l'aimant supraconducteur cryo-réfrigéré contre le chauffage nucléaire.

6 Dimensionnement de la chambre à vide non régi par des charges de pression

Les facteurs les plus exigeants sur le plan structurel sont les charges EM sur la VV et sur les composants internes, dues à diverses instabilités MHD du plasma.

En effet, parmi les différents événements hors normes du plasma que la VV peut être amenée à subir, la disruption du plasma associée à une perte de contrôle de la position verticale, appelée événement de déplacement vertical (VDE), induit des forces électromagnétiques très importantes.

Ce VDE, associé à la phase de disjonction (i.e. « *quench* ») du courant plasma, induit des courants qui, en présence du champ magnétique, chargent les structures, nécessitant une épaisseur totale combinée de la paroi d'environ 120 mm dans certaines régions de la VV. Cette épaisseur a été répartie en deux parois de 60 mm chacune, espacées de 400 mm, afin d'éviter les instabilités de flambement, en particulier dans la région intérieure où la contrainte résultante est compressive (voir Figure 2).

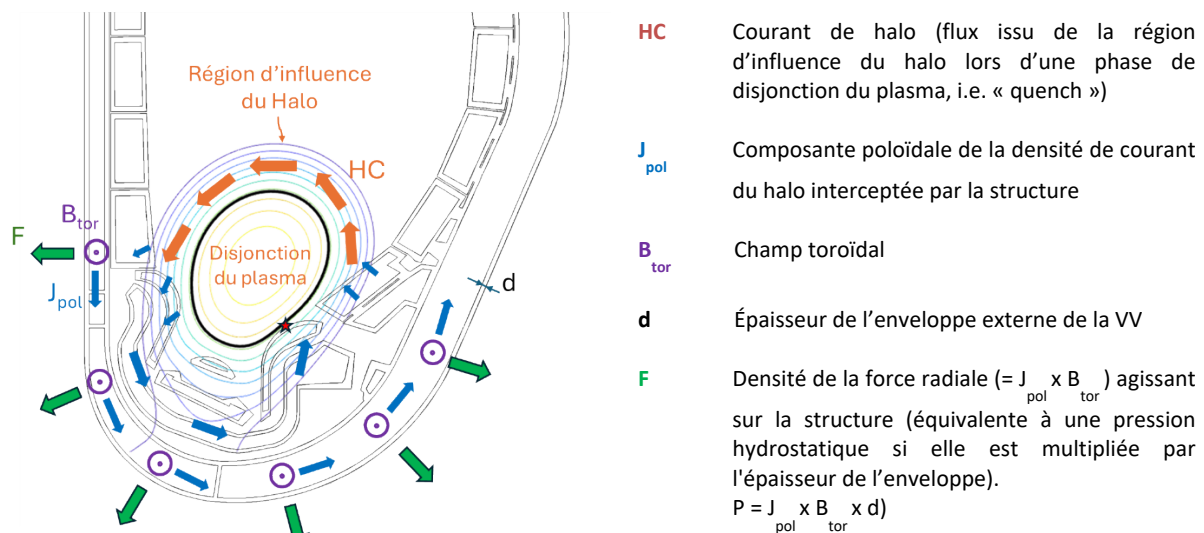


Figure 2 : Distribution du courant et des forces dans la structure de la VV lors d'un événement de déplacement vertical VDE vers le bas.

Ces conditions de charge EM sont détaillées dans [R5], et les conditions de contrainte qui en résultent sont décrites dans [R6]. Parmi les conditions de charge EM, l'évènement de déplacement vertical (VDE) entraîne les charges les plus importantes que peut subir la VV.

Dans ce carter double enveloppe, une combinaison de plaques d'acier structurellement inertes et d'eau, servant de modérateur, mais sans aucune influence sur l'efficacité de la réaction de fusion, a été choisie comme le moyen le plus efficace pour obtenir un blindage nucléaire efficace, voir Figure 3. Ce choix de conception permet également à l'eau de refroidir la VV et de proposer l'étuvage pendant les périodes de maintenance afin d'éliminer les impuretés qui pourraient autrement entraver le fonctionnement du plasma.

Dans le circuit primaire de refroidissement de la VV (VV PHTS), la pression du liquide de refroidissement (i.e. l'eau) à l'entrée de la VV est 12 bar abs à 100°C (y compris la pression hydrostatique) pendant les opérations de plasma pour atteindre un maximum de 18 bar abs à 180°C pendant les opérations d'étuvage (plafonnée par un dispositif de décharge de pression), voir [R8].

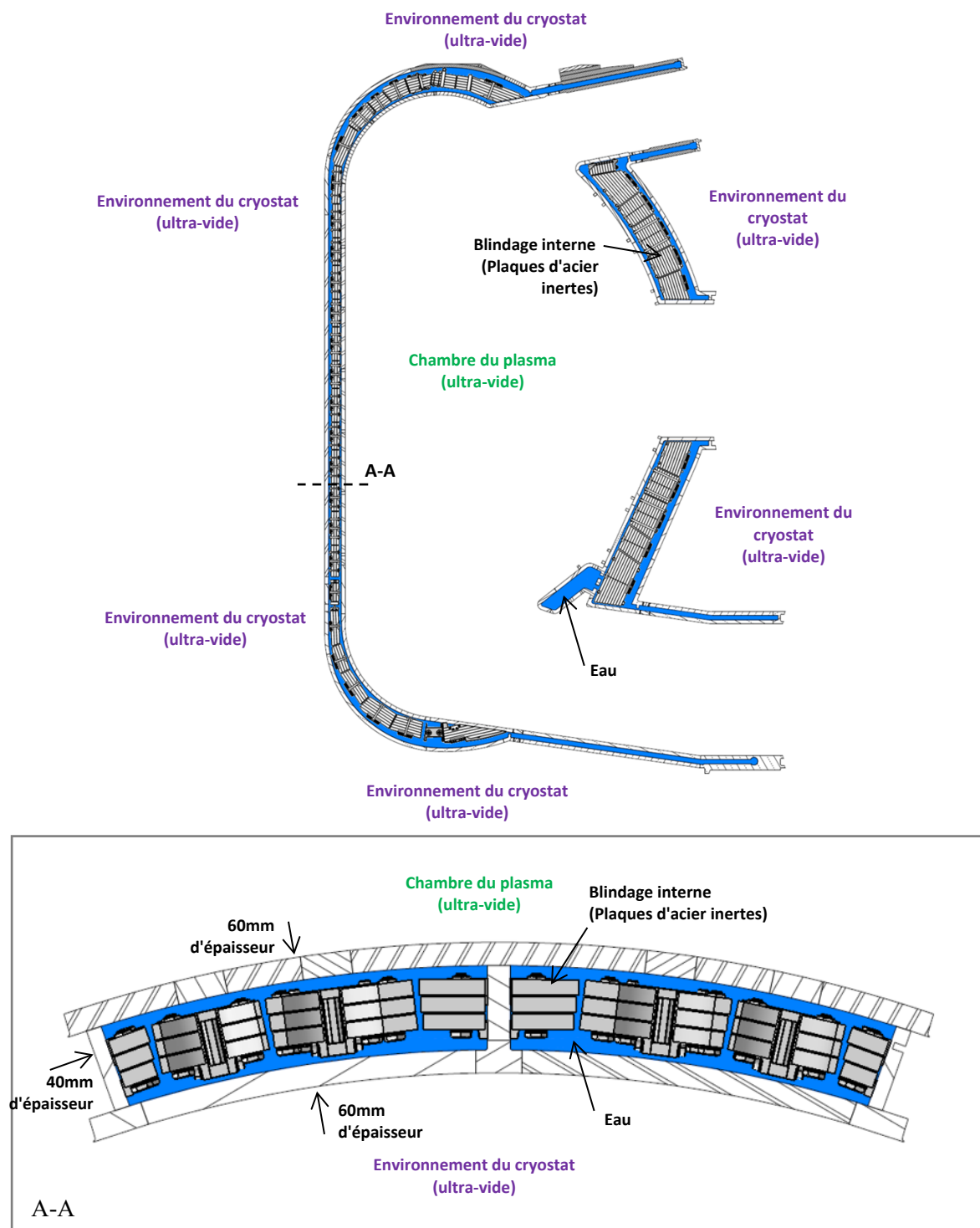


Figure 3 : Structure en acier inoxydable à double paroi de la chambre à vide pour assurer des conditions de vide très poussées dans la chambre du plasma et dans l'environnement du cryostat.

Il est essentiel de souligner que la présence de ce liquide de refroidissement n'influence pas le dimensionnement de la VV. En d'autres termes, même en l'absence de liquide de refroidissement, les mêmes épaisseurs de parois et de renforts seraient toujours nécessaires. Par application d'une approche conventionnelle du comportement des matériaux, type élasto-(parfaitement) plastique (i.e. analyse limite), qui utilise la saturation des contraintes comme indicateur de rupture, le calcul d'intégrité a montré que la pression interne maximale admissible de la VV est de 48,9 bar abs à 100°C sans aucune autre charge [R7].

Comme indiqué précédemment, la VV est principalement conçue pour résister aux charges électromagnétiques importantes générées pendant les opérations de plasma. Plus précisément, l'évènement de déplacement vertical de catégorie III, VDEIII(SD), présente les marges structurelles les plus faibles dans la conception de la VV, voir [R6].

Pour démontrer le rôle prédominant des charges électromagnétiques par rapport à la pression du liquide de refroidissement, une étude comparative a été menée comme détaillé dans [R7]. Cette étude s'est basée sur les résultats de l'analyse limite utilisés pour vérifier l'intégrité structurelle globale de la VV, voir [R6].

Pour effectuer une comparaison quantitative entre les situations de chargement, les valeurs de déformation maximale ont été extraites des analyses limites. Pour garantir l'indépendance des catégories de chargement, un ratio " α " basé sur les admissibles proposés par le RCC-MR a été appliqué, assurant une approche équitable, voir Tableau 1.

Tableau 1 : Rapport des déformations des chargements EM et Pression

Catégorie de chargement	Cas de chargement	Déformation, ε	Rapport $\varepsilon_{EM}/(\alpha*\varepsilon)$
III	DW+CP+VDEIII(SD) @100°C	0.02533	-
I/II	CP : 11 bar abs. @100°C	0.001457	14.86
	DP : 18 bar abs. @180°C	0.005145	4.43

DW : poids propre, CP : pression maximale du liquide de refroidissement pendant les opérations de plasma, VDEIII(SD) : Catégorie III : évènement de déplacement vertical de type lent vers le bas, DP : pression de calcul

Ratio des admissibles RCC-MR, α = admissible (CatII)/admissible (CatIII) ; $\alpha = 1,17$ à 100°C & $\alpha = 1,111$ à 180°C

Note : Un rapport de 14,86 peut être observé pendant le fonctionnement du plasma (Pmax=11bar abs @100°C), voir Figure 4.

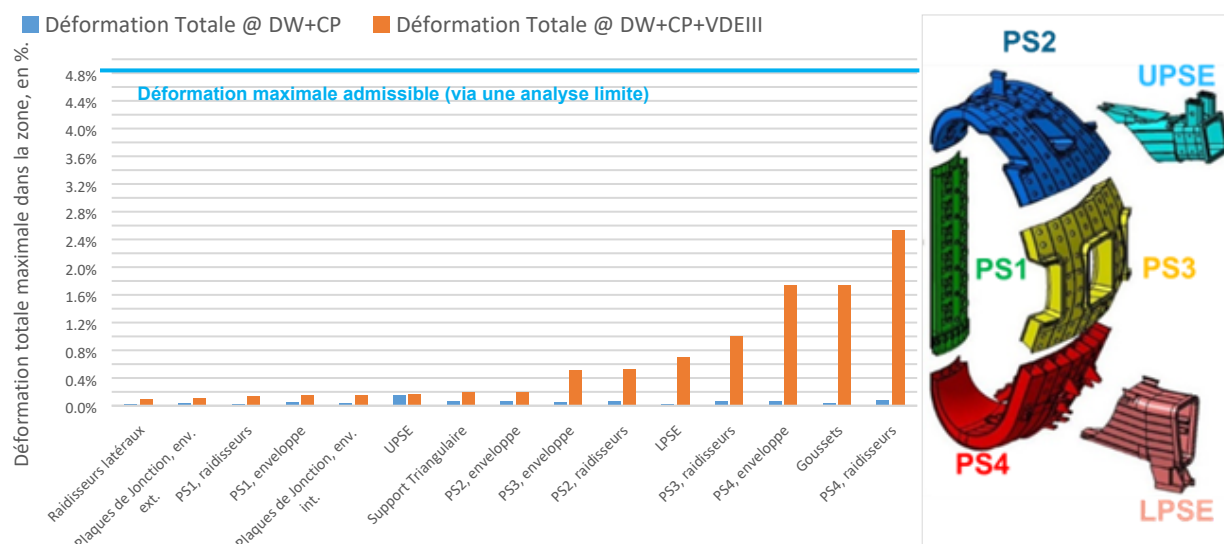


Figure 4 : Déformations totales calculées via l'analyse limite et réparties entre les principales zones de la VV

7 Résumé et conclusion

La comparaison de l'impact structurel sur la VV entre les chargements électromagnétiques (EM) et les chargements de pression dans la double paroi met en évidence la prédominance des forces EM en matière de dimensionnement. Plus précisément, il existe un rapport de 4,43 entre les limites de chargement : a) du chargement EM la plus sévère (VDEIII) et b) de la pression maximale de 18 bar abs à 180°C pendant l'opération d'étuvage - ce rapport augmente de manière significative pour atteindre 14,86 si l'on considère à titre comparatif la pression pendant les opérations de plasma (11 bar abs à 100°C).

La chambre à vide (VV) d'ITER, en tant que carter, a été principalement conçue pour fournir des conditions de vide très poussées (i.e. ultravide) et assurer la résistance, la rigidité et la stabilité à l'égard des conditions de chargement électromagnétique.

Par conséquent, comme la pression ne constitue pas un facteur de dimensionnement significatif, et conformément à l'article R557-9-2 j), la chambre à vide d'ITER n'est pas soumise aux dispositions de la section 9 de l'article R.557 du Code de l'Environnement Français (R.557-9) et n'aurait jamais dû être proposée en tant que telle en premier lieu.

Dans le même temps, reconnaissant les avantages d'adhérer à des règles de conception et de construction robustes, l'Organisation ITER s'engagerait de toute façon à soutenir un programme d'Assurance Qualité (PAQ) rigoureux pour la chambre à vide d'ITER, essentiellement analogue à une évaluation de la conformité du "module H1" telle que définie à l'annexe III de la directive PED 2014/68/UE. Ce PAQ spécifique serait évalué et contrôlé par un organisme d'inspection. Cet organisme d'inspection effectuerait les audits initiaux et périodiques nécessaires afin d'évaluer l'efficacité, la pertinence et la mise en œuvre pratique de ce PAQ, y compris les procédures de fabrication, les essais non destructifs, l'évaluation de l'auto-conformité, la certification du personnel d'ITER chargé de superviser les activités de fabrication et la formation.

Annexe 1

Chambre à vide d'ITER en tant que carter selon le paragraphe 557-9-2-j) du Code de l'Environnement Français

En 2009, la chambre à vide (VV) a été classée comme ESPN Cat. IV-N2 sur la base d'une proposition de l'Organisation ITER (IO), qui définissait la VV comme un équipement à compartiments multiples avec une structure en caisson à double paroi dans laquelle le liquide de refroidissement (i.e. l'eau) est confiné. Cependant, IO estime aujourd'hui que cette classification, bien que probablement considérée comme pragmatique à cette période pour aligner ITER sur un cadre existant, n'était pas tout à fait appropriée. Les règles utilisées n'étaient pas, et ne sont toujours pas, totalement adaptées à la fonction première du composant, qui est de fournir des conditions de vide très poussé, i.e. ultravide (à la fois dans la chambre du plasma et dans l'environnement du cryostat).

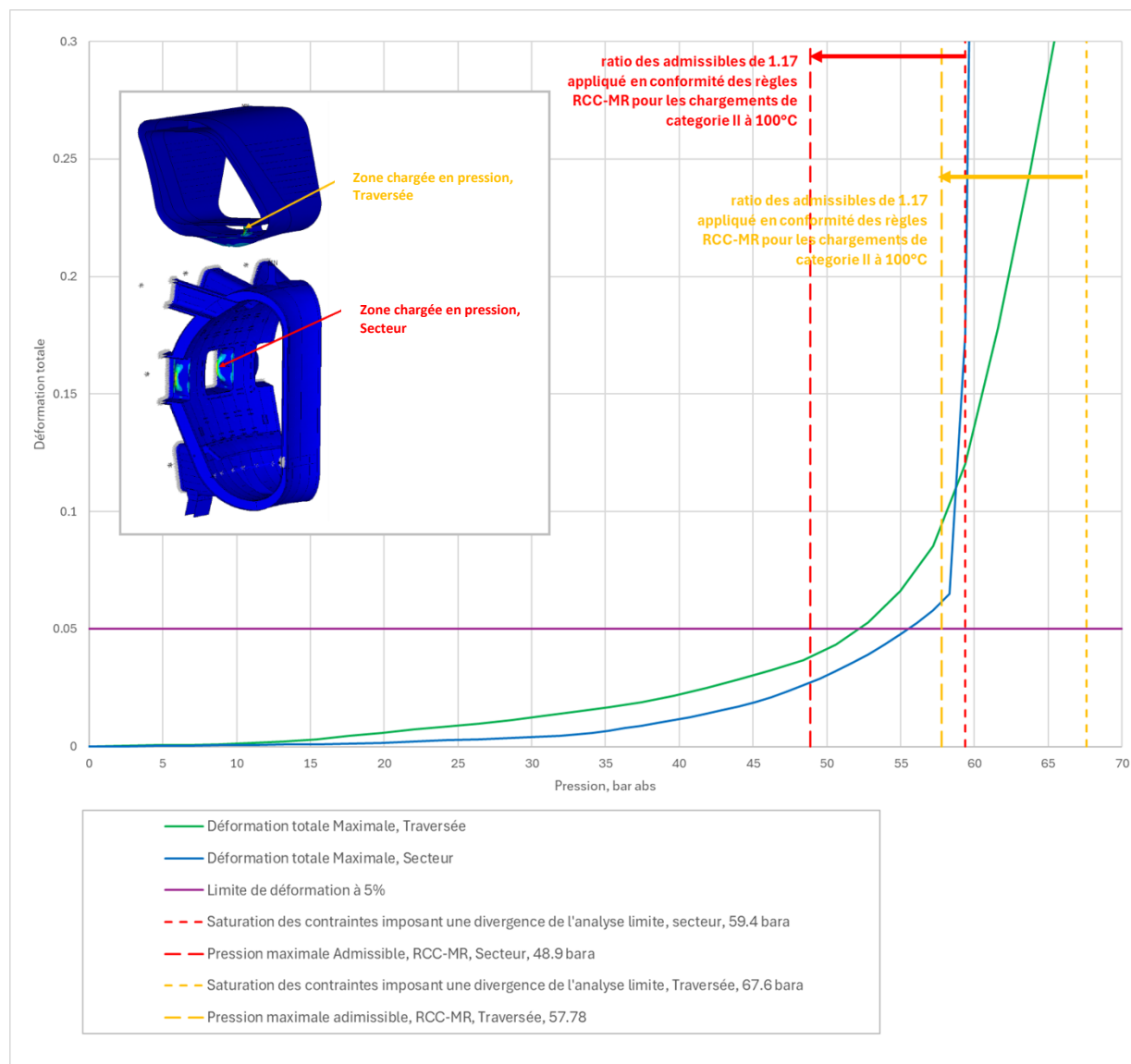
En effet, le compartiment principal de cette équipement multi-compartiments est la chambre du plasma, où la réaction de fusion est confinée, avec une pression en service (PS) inférieure à 0,5 bar dans toutes les conditions normales de fonctionnement. Le système de suppression de la pression de la VV (VVPSS) garantit que la pression ne dépasse jamais 0,5 bar, même dans des situations exceptionnelles ou hautement improbables. Sur la base de cette description, la VV n'est plus considérée comme un équipement sous pression, mais plutôt comme un carter garantissant des conditions de vide.

Conformément au CLAP X-017 (Orientation A-11), la VV est classée comme un carter et n'entre pas dans le champ d'application de l'article R.557-9 (et par la suite R.557-12 concernant les équipements sous pression nucléaires) car elle n'est pas principalement conçue pour remplir une fonction de confinement de la pression (comme cela a été démontré au chapitre 6).

Annexe 2

Pression maximale admissible par la chambre à vide VV

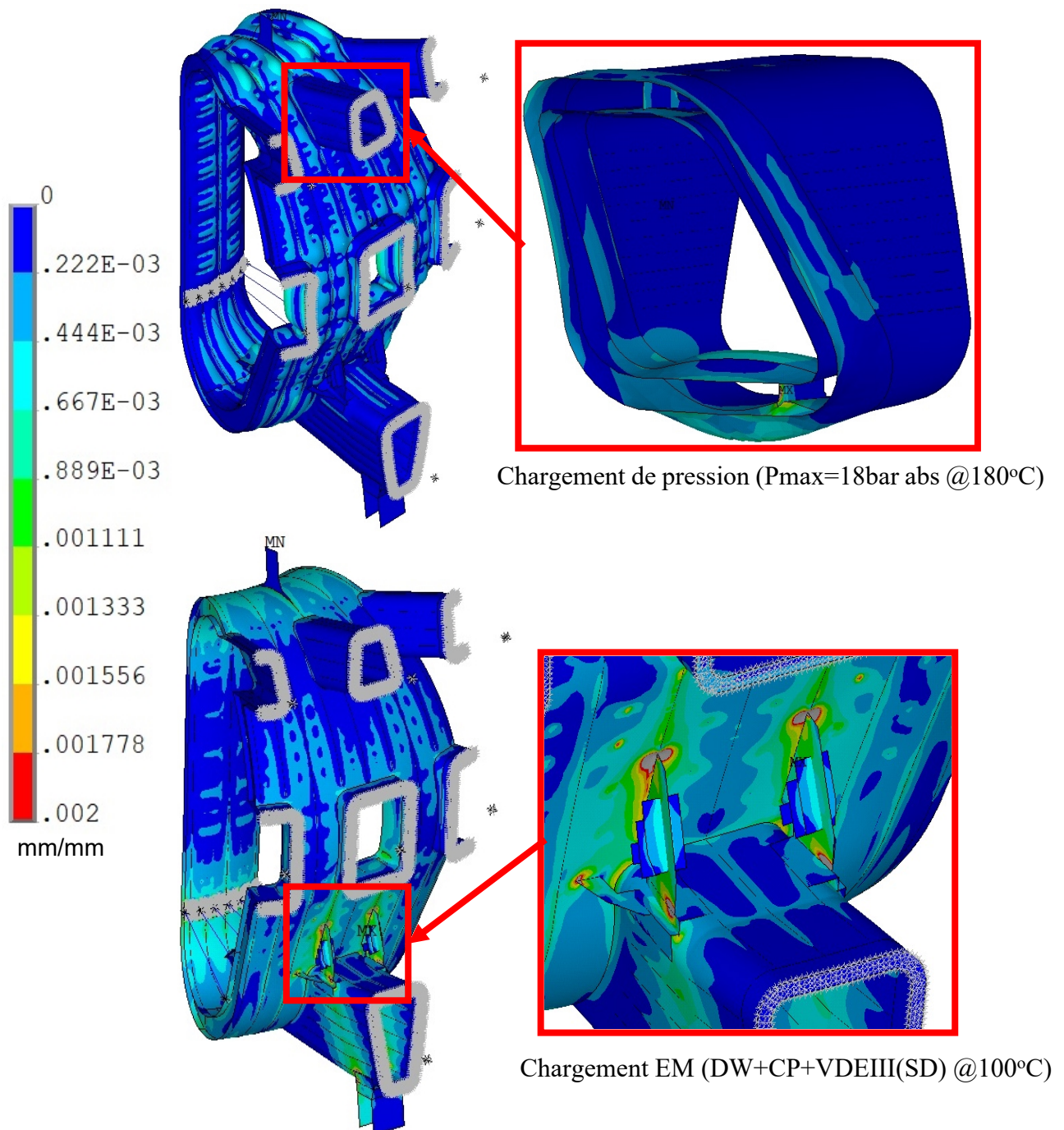
Cette annexe propose l'évolution des déformations calculées par analyse limite en fonction du chargement de pression jusqu'à saturation de la contrainte comme indicateur de rupture. La figure ci-dessous met l'accent sur les deux zones de la VV les plus défavorables en fonction de la pression. La pression maximale acceptable par la double paroi de la VV est de 48,9 bar abs à 100°C selon le RCC-MR [RB 3251.12].



Annexe 3

Distribution des déformations dans la chambre à vide pour les situations représentatives : chargement de pression et chargement électromagnétique

Cette annexe propose une comparaison de la distribution de déformations calculées par analyse limite entre le chargement de pression et le chargement électromagnétique. Parmi tous les chargements électromagnétiques, l'évènement de déplacement vertical de catégorie III VDEIII(SD) combiné au poids propre DW et à la pression du liquide de refroidissement CP DW+CP+VDEIII(SD) a été sélectionné en raison des marges structurales les plus faibles de la conception de la VV.



La figure ci-après illustre les valeurs totales de déformation par analyse limite réparties sur les principales zones VV pour les situations représentatives.

