

LA GAZETTE NUCLEAIRE



Prix : 6 € • Abonnement (1 an) :
France : 24 €
Étranger : 30 €
Soutien : à partir de 30 €

Publication du Groupement de
Scientifiques pour l'Information sur
l'Énergie Nucléaire
(GSIEN)

47^{ème} année
INSS 0153-7431
Trimestriel
Août 2023

300

ITER : l'illusion de la fusion industrielle

EDITORIAL

L'illusion d'une possible industrialisation de la fusion, à grands renforts de communication tronquée dans la presse, est entretenue avec le projet ITER, le réacteur de recherche sur la fusion en construction à Cadarache. Retards, surcoûts et malfaçons s'accumulent comme pour l'EPR de Flamanville 3 qui présente des défauts de fabrication (acier de cuve, soudures, etc.) mais aussi des défauts de conceptions (hydraulique de cuve et ligne d'expansion du pressuriseur par exemple). Ce réacteur qui devait attester de "l'excellence" du nucléaire français se révèle comme un fiasco technico-financier.

Qu'à cela ne tienne, la décision de construire plusieurs EPR 2 a été annoncée avant le démarrage de Flamanville 3 et avant même la tenue d'un débat public sur le sujet. D'autre part, les autorisations de construction vont être considérablement allégées, les chantiers pouvant débuter avant même la tenue de l'enquête publique. A l'évidence, la signature du Décret d'autorisation de création de la première paire de réacteurs (à Penly) ne sera qu'une formalité.

Plus *light* en termes de sûreté que l'EPR, le coût de construction d'un programme de six EPR 2 a été estimé à 46 Md€ début 2021, pour être réévalué dans une fourchette de 54 à 63 Md€ à fin 2021. Sans compter l'inflation... Mais qui peut encore croire

aux estimations grossièrement sous-évaluées dont l'industrie nucléaire a le secret ? Pas le ministère des finances en tout cas : Bercy chercherait un cabinet d'audit pour refaire un chiffrage du programme.

Tous les chantiers de nouveaux réacteurs connaissent des dérapages conséquents tant en termes de coûts que de délais. Cela aurait pu donner matière à réflexion quant à l'opportunité d'en construire de nouveaux. Pourtant, "on" entend lancer la construction d'EPR 2 à marche forcée bien que son design soit loin d'être finalisé. A cause d'évolutions significatives par rapport à l'EPR, l'EPR 2 va devoir franchir l'étape d'un nouveau *licensing* qui nécessitera instruction (pendant plusieurs années) et validation par l'ASN.

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) s'appuie sur l'expertise de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) qui publie ses avis et recommandations. L'exécutif a eu la tentation subite de museler cette expertise indépendante de l'autorité décisionnelle en la fusionnant dans l'ASN. La mayonnaise n'a pas pris, députés et sénateurs ayant refusé cette réforme de la sûreté tout en trouvant un accord sur le projet de loi de relance du nucléaire pour accélérer la construction de nouveaux réacteurs... *Statu quo* donc sur la fusion

SOMMAIRE

Éditorial	
Hommage à Jean-Claude Fusion ASN/IRSN	2
Dossier ITER	3
Présentation du tokamak	4
Objectif d'ITER	6
Défi du plasma - B. Carreras	7
Avis IRSN du 8/12/2021	8
Cartographie radiologiques	8
Analyse	11
ITER se fissure déjà (CSC)	12
Produits de fission et béryllium	13
Déchets radioactifs	15
Rejets radioactifs	18
Radioprotection	19
Coûts et délais	21
Tritium - Raymond Sené	23
ITER et ses défauts - D. Jassby	26
Gestion toxique d'ITER - Reporterre	30

www.gazettenucleaire.org

Email : contact@gazettenucleaire.org

Abonnement, courrier, soutien :
GSIEN – 2 Allée François Villon
91400 ORSAY

ASN/IRSN. Pour l'instant. Car rien n'empêche le gouvernement, lors d'une prochaine session parlementaire, de dégainer l'artillerie lourde (calibre 49.3) pour faire aboutir les orientations martelées par le "Patron".

Ce serait le retour du "Zinzin" ou SCSIN (Service central de sûreté des

installations nucléaires) créé en 1973 pour mettre en place « *un système souple au cœur du plan Messmer* »*... Le Zinzin, doté de peu de moyens, faisait appel au CEA en tant qu'expert technique sur les questions de sûreté. La création de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) en 1976 ne résoudra pas l'absence d'indépendance entre le SCSIN et l'IPSN qui est rattaché au CEA. "Autorité" et expertise restent liées. De fait, indépendance et transparence ne font pas parties de leurs préoccupations. Les falsifications de défauts sur des pièces fabriquées dans les usines du Creusot, des pièces installées en toute opacité sur le parc actuel, sont le résultat de cette collusion entre autorité, expertise et industriel. Il faudra des décennies pour l'apprendre.

Ce n'est qu'une douzaine d'année après Tchernobyl que le concept de transparence et d'indépendance s'imposeront dans la régulation des risques nucléaires. Il faudra attendre 2002 pour quel l'IPSN, en fusionnant avec l'OPRI (Office de protection contre les rayonnements ionisants), devienne l'IRSN qui s'ouvrira alors à la société civile sous l'impulsion d'Annie Sugier. L'IRSN est un Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) indépendant financièrement de l'autorité de sûreté nucléaire ; il remplit une mission de service public sous tutelle ministérielle. D'autre part, le Zinzin évoluera en DSIN, puis DGSNR pour devenir ASN en 2006 (loi dite TSN, Transparence et sécurité nucléaire).

Depuis cette loi, le long chemin vers la transparence, que d'aucuns trouve incomplète, agace prodigieusement les industriels de l'atome. Sans ce système dual, nous n'aurions probablement rien su des problèmes de l'EPR de Flamanville 3 que nous avons pu appréhender en partie grâce aux publications régulières de l'ASN et de l'IRSN.

Si un pogon de dingue ruisselle pour la construction d'ITER (financement international), les banques restent frileuses pour investir dans de nouveaux réacteurs de fission. Qu'importe, il n'y aura qu'à siphonner le livret A, une façon comme une autre de faire financer par les pauvres la future catastrophe qu'ils auront à subir.

Jean-Claude

* Citation de la [SFEN](#). C'est le plan Messmer qui a lancé le programme de construction de réacteurs PWR (ou REP) sous licence américaine.

Le Patron ?



« Nucléaire : Macron le fondateur »
(Le Canard enchaîné du 8/02/23)

La fusion ASN/IRSN inquiétait au plus haut point Jean-Claude qui avait centré son édito sur ce sujet. Le rejet parlementaire qui se dessinait ne l'avait pas complètement rassuré et il craignait un passage en force du gouvernement pour faire aboutir cette réforme. C'était également la crainte du personnel de l'IRSN, mobilisé contre ce projet. Un récent communiqué de presse de l'intersyndicale de l'IRSN vient confirmer toutes ces inquiétudes (Cf. page suivante).

Jean-Claude se faisait une joie de fêter cette 300^{ème} Gazette : ce numéro lui est dédié avec une pensée pour sa compagne qui l'a soutenu pour passer, en toute sérénité, de l'autre côté. Bon vent Capitaine...

Michel

Notre ami **Jean Claude Autret** nous a quitté le 23 avril 2023.

Lors de l'AG de février 2020 Monique, après une cinquantaine d'années de conduite du GSIEN, passait le flambeau. Elle avait bien mérité ce repos après avoir tant donné.

Mais la question qui se posait était critique : qui aurait le courage, voire l'inconscience de prendre sa succession (nota : nos amis scientifiques de la première heure sont dans la même gamme d'âges que nous !!!).

Apparut alors Jean-Claude. A ce moment-là, en dehors de sa présence à la création de l'ACRO (conséquence de Tchernobyl) où il fut administrateur

et président, nous n'avions pas une idée précise de son cursus.

Mais son dynamisme, son efficacité, sa gentillesse, estompèrent très vite les quelques appréhensions. Sa façon d'aborder les questions tant techniques que d'ordre épistémologique ou relationnelles, lui permettait d'affirmer sa présence dans de nombreux groupes de travail (où dans certains il avait côtoyé Monique). Je crains ne pas être complet, mais je peux citer les Groupes permanents d'experts auprès de l'ASN : GPD (Déchets), GPU (Usines et laboratoires), GPESPN (Equipements sous pression nucléaires), GPDEM (Démantèlement). Sans oublier les CLI (Flamanville, Orano La-Hague, Brennilis, ...), le CODIRPA ...

Sa formation d'enseignant, ses études en mécanique (avec les meilleurs spécialistes de l'arsenal de Cherbourg), lui donnèrent une compétence redoutable.

Après la tragédie de Tchernobyl, pendant une dizaine d'années, il fit de très fréquents séjours en Biélorussie où il eut de nombreux contacts avec d'illustres radio biologistes (Vassili Nesterenko, Rosa Goncharova, ...) Tout cela fit qu'en 2020 il devint le nouveau pilier du GSIEN. Pour nous ce fut un soulagement.

Depuis quelque temps, il avait entrepris le « sauvetage » des documents d'archive accumulés depuis une cinquantaine d'années à notre domicile ... que de pépites !

C'était trop beau ! La dernière année, il accumula les problèmes de santé, une application brutale de la loi de Murphy (dite pour les néophytes « loi de l'emm...ement maximum ») et cela le conduisit à une issue finale.

Heureusement que notre « ultra vaillante » secrétaire du GSIEN, Fabienne, a repris le flambeau de ce grand œuvre.

Un nouveau problème se présente. Il va falloir trouver un autre lieu de stockage, d'entreposage de ces centaines de boîtes archives dont de nombreuses avaient déjà trouvé refuge au Haut Pitot.

Ce choc brutal, la disparition de Jean-Claude, nous amène à réfléchir au futur - pas celui du nucléaire - nos fous

actuels sont en train de proroger ses nuisances pour plusieurs siècles !!!

Il nous semble indispensable que subsiste une analyse critique incontestable, que continue le travail commencé il y a plus de 50 ans. Sous quelle forme ? La réflexion est ouverte : une fondation ? une structure pérenne dotée de moyens puissants ? un centre de regroupement d'archives ? un centre ouvert au plus grand nombre de « curieux » qui n'acceptent pas qu'officiellement soit déclaré qu'on « découvre » aujourd'hui des

« défauts » qui figuraient dans les rapports de fabrication datant de la construction, dans les années 70-80 ... Jean Claude, la poursuite de ce travail est le plus bel hommage que l'on peut te rendre.

Monique et Raymond Sené

Je conserverai le souvenir d'un collègue humainement agréable, impliqué, avec des convictions, et toujours prêt à échanger sur les sujets techniques.

Il participait activement aux réunions des groupes permanent d'experts dont il était membre ; il y apportait une vision de terrain, faisait part de ses questionnements et s'impliquait dans la recherche de conclusions consensuelles.

Malgré sa maladie, il est resté actif le plus longtemps possible, toujours égal à lui-même, courageux et fidèle à ses principes de vie.

Thierry Charles
Président du GPR

Dernières minutes, le Patron reprend la main

Intersyndicale de l'IRSN (CFDT, CFE-CGC, CGT)

Communiqué de presse du 12 juin 2023

LE PROJET DE FUSION IRSN-ASN EST DE RETOUR !

Mardi 6 juin 2023, le député Jean-Luc Fugit et le sénateur Stéphane Piednoir, tous deux membres de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), ont procédé à une *audition privée* de l'intersyndicale de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Celle-ci a été réalisée dans le cadre de l'étude des conséquences du projet du gouvernement d'intégrer l'IRSN dans l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), commanditée par le Sénat à l'OPECST le 25 avril dernier et dont ils sont rapporteurs.

Le risque d'un retour du projet de fusion IRSN-ASN à l'issue de cette étude est bien réel, et l'intersyndicale craint que ce le soit quel que soit sa conclusion. L'intersyndicale appelle l'ensemble des salariés de l'IRSN, de l'ASN, des opérateurs nucléaires, les scientifiques qui travaillent sur les risques nucléaires et radiologiques, les parlementaires et les citoyens à la mobilisation.

UN GRAND ABSENT : LE DIAGNOSTIC DE L'EXISTANT

L'étude qui a été engagée par l'OPECST va permettre d'identifier les impacts du projet de fusion IRSN-ASN. Elle est insuffisante car elle ne traite pas le diagnostic du système existant de gouvernance des risques nucléaires et radiologiques, diagnostic qui n'a jamais été présenté. Son absence laisse de côté la question de l'opportunité de ce projet, ce qui est inacceptable. Comment justifier que la fusion IRSN-ASN puisse être la solution à des problèmes non définis ?

LA DISCRETION SOURCE DE SUSPICION

Le 8 février, la Ministre de la transition énergétique a annoncé son projet de démantèlement de l'IRSN par un communiqué de presse. Aujourd'hui, c'est la discrétion qui prévaut. Les auditions sont privées, les rapporteurs n'ont pas prévu d'auditions publiques, la liste des personnes auditionnées n'est pas accessible, les conclusions de l'étude seront présentées le 11 juillet en pleine période estivale. Cette discrétion fait naître la suspicion.

FUSION = EXPERTISE DEGRADEE

Lors de son audition, l'intersyndicale a insisté sur le fait que l'intégration de l'IRSN dans l'ASN, autorité administrative indépendante, rendrait impossible la réalisation de certaines recherches menées actuellement par l'IRSN et réduirait l'attractivité des emplois proposés aux experts et chercheurs, avec à la clé une dégradation de la qualité scientifique de l'expertise :

- les recherches et développements menés en partenariat avec les exploitants nucléaires et les industriels,

- le pilotage ou la participation à des programmes de recherche européens et internationaux, notamment dans le domaine de la santé.

Inversement, le positionnement de l'expertise et de la recherche dans deux organismes distincts qui était prévu dans le projet initial du gouvernement, affaiblirait aussi la compétence d'expertise du fait de son éloignement de la recherche. C'est d'ailleurs la reconnaissance de ce risque qui a conduit le gouvernement à abandonner ce schéma.

FUSION = CREDIBILITE DE L'EXPERTISE DEGRADEE

Une expertise réalisée au sein de l'autorité de sûreté serait inévitablement considérée comme *sous le contrôle* de l'autorité de sûreté. C'est d'ailleurs un des objectifs affichés du projet du gouvernement que de supprimer les écarts entre avis d'expert et décision. Et c'est précisément ce positionnement qui est à l'origine des critiques auxquelles l'ANSES doit faire face actuellement.

La fusion entraînerait également une perte de transparence du processus de prise de décision : la traduction de l'expertise en décision étant réalisée au sein de l'autorité et les conclusions de l'expertise n'étant plus publiées avant la décision.

FUSION = CONCENTRATION DES POUVOIRS

Confier l'ensemble du processus qui va de l'expertise à la décision, à une autorité indépendante de l'état, dirigée par un président nommé pour 6 ans par le Président de la République, donnerait un large pouvoir à une entité unique,

A propos du projet de fusion ASN/IRSN, Thierry Charles : "**Il y a un risque de perte de la confiance sociale dans le système de contrôle nucléaire**".

[Radio France, 13/03/23](https://www.radiofrance.fr/franceinter/emissions/le-directeur-de-l-irsn-2023-06-13)

ce qui pourrait présenter des risques en fonction des personnes.

Dans le domaine de la santé, de nombreux travaux de l'IRSN ne sont pas liés à des décisions ASN. Les placer « sous contrôle de l'ASN » dégraderait leur crédibilité. Ceci conduirait également à une déstabilisation du partage des pouvoirs entre certaines administrations centrales (DGT, DGS, DGPR, Affaires étrangères) et l'autorité de sûreté qui aurait la maîtrise de l'expertise dont ces administrations ont besoin pour prendre leurs décisions.

FUSION = COMPLEXIFICATION DE L'EXPERTISE DE DEFENSE

Le flou le plus complet entoure le projet du gouvernement concernant l'expertise nucléaire de défense. Il serait pour le moins surprenant que l'Etat la confie à une autorité administrative indépendante. Mais la constitution d'une ASN-Défense disposant de capacités d'expertise propres conduirait à de trop nombreux doublons. Elle conduirait également à une perte progressive de la cohérence des approches de sûreté entre installations civiles et de défense, alors même que l'expérience acquise sur les réacteurs de propulsion des sous-marins doit bénéficier au développement des petits réacteurs modulaires (SMR).



Dossier ITER

La fission de noyaux d'atomes lourds (^{235}U ou ^{239}Pu) a permis à l'homme de fabriquer des bombes atomiques (dites bombes A) puis, en la maîtrisant, de propulser des sous-marins et de produire de l'électricité avec des centrales nucléaires. L'avènement des bombes à hydrogène (dites bombes H) met en œuvre la fusion de noyaux légers comme c'est le cas dans le soleil et la plupart des étoiles (fusion de noyaux d'hydrogène). L'homme rêve d'approprier l'énorme quantité d'énergie dégagée par la fusion. Avec les physiciens Igor Tamm et Andreï Sakharov (les pères de la bombe H) les soviétiques ouvrent le bal en 1958 avec la construction du premier engin de recherche, le tokamak T1. L'optimisme est de mise : « En 1950, nous espérons réaliser le réacteur thermonucléaire en 10 ans, 15 ans au grand maximum » (Mémoires d'Andreï Sakharov, 1990). En 1968, le tokamak T3 soviétique atteindra un record : faire un plasma de 10 millions de degré pendant quelques millisecondes...

ITER : 45 ans de mûrissement pour 400 secondes de plasma...

Pour la fission nucléaire, neuf ans ont séparé la première explosion en 1945 de la première centrale électrique couplée au réseau en 1954. Rien de tel avec la fusion, entre la première bombe H en 1952 et ... ?

A l'époque, deux idées technologiques s'affrontent ; le confinement inertiel par laser (on comprime le combustible contenu dans des billes par des décharges laser) et le confinement magnétique (création de plasma dense par champs électromagnétiques dans des Tokamaks bien plus développés...). Mais que ce soit en 1960 ou en 1980, la fusion contrôlée est toujours pour dans 50 ans...

Arrive novembre 1985 et la rencontre à Genève entre Reagan et

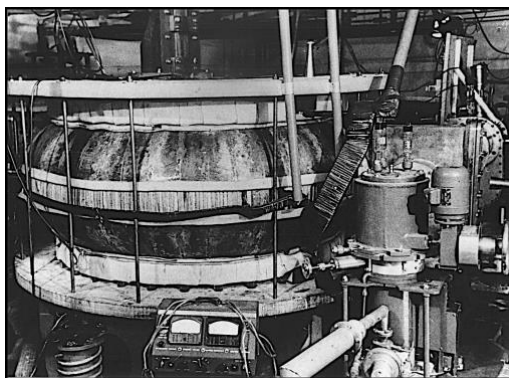
LA SOLUTION : AMELIORER LE SYSTEME EXISTANT

Il apparaît légitime d'étudier les conséquences d'un projet de fusion IRSN-ASN. Mais il apparaît également légitime d'étudier le projet d'une amélioration du système existant. A cet égard, nous avons présenté 4 axes de réflexion aux rapporteurs : renforcement des moyens financiers et humains de l'IRSN et de l'ASN, reprises des expertises à caractère réglementaire par une ASN renforcée, mutualisation du centre de crise, meilleure coordination de certaines actions d'ouverture à la société.

La comparaison des bénéfices des projets **Fusion IRSN-ASN versus Amélioration du système existant** est nécessaire car ces bénéfices doivent être mis en regard du coût des deux projets. D'ores et déjà, il est certain que le coût de la fusion serait considérablement plus élevé que celui de l'amélioration, compte tenu de l'ampleur du chantier sur les plans technique, organisationnel, social. De plus, la déstabilisation de l'organisation (ASN et IRSN) entraînée par la fusion serait durable et ne manquerait pas de ralentir le programme de relance du nucléaire en France.

En conclusion nous avons la conviction que cette étude de l'OPECST sera utilisée par la Ministre pour justifier de présenter à nouveau son projet de fusion, et ce quelles que soient ses conclusions. Si tel est le cas, les salariés de l'IRSN seront à nouveau au rendez-vous !

Gorbatchev pour marquer la fin de la guerre froide et le désarmement nucléaire. En conclusion, sur proposition de Gorbatchev les deux duettistes proposent de développer la fusion pacifique "pour le plus grand bénéfice de l'humanité" et en utilisant l'approche tokamak.



Tokamak soviétique T1 - Institut Kurchatov

Source, iter.org

L'Europe (Euratom) et le Japon se joignent aux discussions préliminaires en 1988 (deux ans après la décision...). Commence alors la phase de conception (Conceptual Design Activity) censée faire le point sur les recherches en cours chez les partenaires. Recherches publiques ou non, et la confiance régnant, il faut bien deux ans pour que cette phase s'achève en 1990. Encore deux années de palabres et en 1992 démarre la phase d'ingénierie (Engineering Design Activity) pour 6 ans, avec les USA quittant le projet (préférant le confinement par laser). Il faut deux

ans de plus pour revoir le projet sans les USA, et après encore un an, en 2002, tout est prêt pour le début des discussions de conception, de finances, de lieu... avec la Chine et la Corée, et le retour des USA.

Quatre ans après, en novembre 2006 c'est la signature de l'accord final ITER, avec la Chine, la Corée, les USA, la Russie, l'Inde, le Japon et l'Europe (du moins officiellement...). ITER sera à Cadarache, payé à 45% par l'Europe...

En 2007, les premiers travaux de terrassement commencent, les retards s'annoncent (13 ans de retard prévus en 2022, avec les erreurs de réalisation) et les coûts s'envolent (passant de 5 à 19 milliards d'euros).

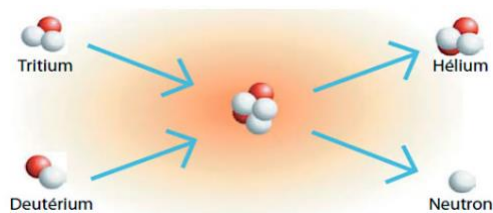
ITER se compare souvent au CERN, le plus imposant projet international scientifique actuel. Mais entre les premières idées du CERN (1946) et les premiers faisceaux de particules, il s'est écoulé moins de 10 ans. Entre le sommet de Genève et le démarrage de ITER en 2030 – si tout va bien – il se sera passé 45 ans...

Sans oublier le fait qu'ITER est d'abord un joujou du CEA : les USA continuent d'explorer le confinement par laser (première fusion positive durant quelques millisecondes en 2022), l'Allemagne a son Stellarator, et l'Europe conserve son Tokamak JET en grande Bretagne...

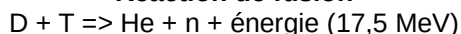
C'est beau, un développement technologique commun....

Une machine expérimentale

ITER est une installation mettant en œuvre une réaction de fusion nucléaire. L'exploitation débutera avec « les opérations plasma d'hydrogène et d'hélium », suivront ensuite « les opérations plasma de deutérium/deutérium » avec enfin la mise en œuvre de la fusion entre deux noyaux d'isotopes de l'hydrogène : le deutérium (D) et le tritium (T). L'objectif affiché est de « générer 500 MW de puissance de fusion dans le plasma pendant 400 secondes » [iter.org]. Sans pour autant tenter de récupérer l'énergie produite.



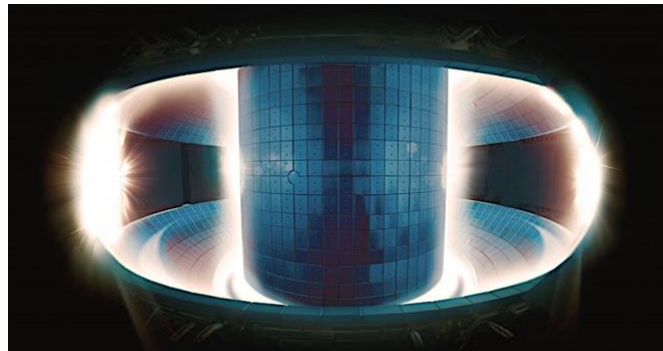
Réaction de fusion



En fait, ITER ne va produire que des déchets nucléaires : « Le flux de neutrons issus de la réaction cède son énergie à la paroi en la chauffant et en activant les matériaux qui la constitue. On a ainsi une production d'éléments radioactifs lourds, en quantité certes inférieure à celle produite dans les réacteurs à fission » [Gazette n° 201/202].

« La proposition finale pour le tokamak d'ITER aboutit en 2001. Il fut conclu que la combinaison finale des paramètres d'ITER était l'ensemble optimum qui permettrait de démontrer la faisabilité de la fusion à un coût raisonnable

pour l'installation de recherche. La puissance de fusion devrait atteindre 500 Mégawatt. Pour cela le champ magnétique toroïdal devait avoir 5,3 Tesla au centre du plasma et atteindre un courant plasma de 15 Mégampère » [Demande d'autorisation de création - Pièce 6 : Étude d'impact - ITER Organization, 2011].



Plasma dans le tokamak coréen KSTAR

Source, iter.org

C'est « la création des champs magnétiques intenses qui piègent le plasma. Cela est réalisé (JET) par des courants électriques intenses circulant dans des bobines et par le courant électrique qui traverse le plasma lui-même. Pour éviter l'échauffement des bobines conductrices elles doivent être refroidies à des températures très basses, proches du zéro absolu (-273°C) et n'offrent alors aucune résistance au passage du courant (bobines supraconductrices) ». C'est là le paradoxe de la fusion : refroidir des bobines à une température proche du zéro absolu au voisinage d'un plasma à plus de 100 millions de degrés...

« Le plasma est alors confiné dans une zone torique (forme d'une chambre à air) sans contact avec les parois matérielles entre lesquelles il évolue ».

Une des difficultés est de « résoudre le problème des instabilités du plasma pour empêcher les particules chargées électriquement qui le constituent de frapper la paroi matérielle à l'intérieur de laquelle il évolue » [Gazette n° 201/202].

Explication avec le physicien Pierre-Gilles de Gennes

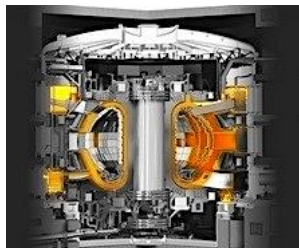
« On n'est pas capable d'expliquer totalement l'instabilité des plasmas ni les fuites thermiques des systèmes actuels. On se lance donc dans quelque chose qui, du point de vue d'un ingénieur en génie chimique, est une hérésie. Et puis, j'aurais une dernière objection. Connaissant assez bien les métaux supraconducteurs, je sais qu'ils sont extraordinairement fragiles. Alors, croire que des bobinages supraconducteurs servant à confiner le plasma, soumis à des flux de neutrons rapides comparables à une bombe H, auront la capacité de résister pendant toute la durée de vie d'un tel réacteur (dix à vingt ans), me paraît fou » [Les Echos, 12/01/2006 ou archive Wikipédia]

Un problème important à résoudre est l'élimination des impuretés qui résultent des interactions entre le plasma et le revêtement de la chambre torique qui contient le plasma. L'idée est d'utiliser pour cela un déflecteur magnétique le "divertor" : les impuretés sont séparées, à ce niveau, du reste du mélange et aspirées par des pompes cryogéniques » [Gazette n° 201/202].

Présentation du tokamak ITER

Chambre à vide

« La chambre à vide a pour fonction essentielle de contenir le plasma chaud. Pour cela, elle forme une enceinte étanche dans laquelle un vide très poussé, de l'ordre de 10^{-7} Pa [1.10^{-12} bar], permet d'assurer un niveau très faible d'impuretés dans le plasma » [1]. Enceinte en acier inoxydable, « large de 19 mètres, haute de 11, présentant un rayon de 6 mètres, la chambre à vide pèse 5 200 tonnes » [2].

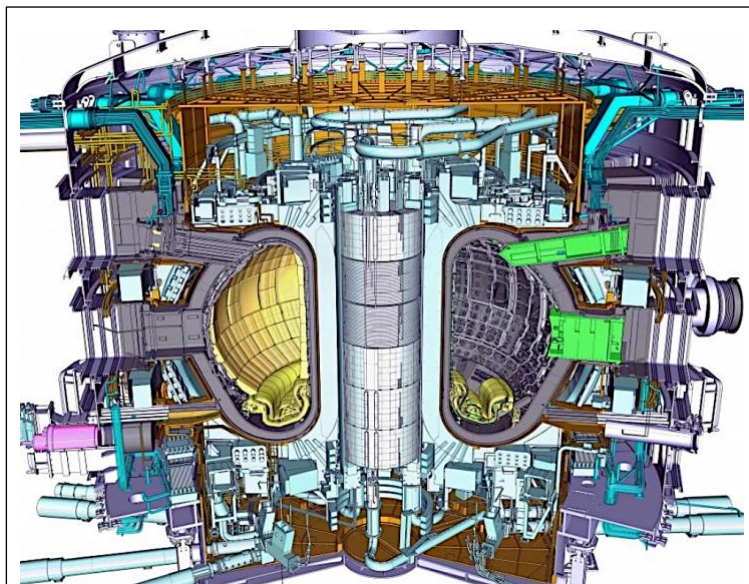


Chambre à vide

Couverture

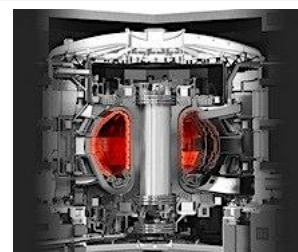
« La chambre à vide sera équipée de modules de couverture, remplaçables, qui seront constitués de matériaux absorbant la puissance thermique émise par le plasma et les neutrons générés par les réactions de fusion » [1].

Elle est constituée de « 440 modules » ; « Chaque module mesure 1 x 1,5 mètre et pèse jusqu'à 4,6 tonnes. Il en existe quelque 180 variantes (en fonction de l'emplacement du module au sein de la chambre à vide) ». « La couverture est l'un des composants d'ITER les plus critiques et les plus délicats à réaliser du point de vue technique car elle se trouve, tout comme le divertor, directement positionnée face au plasma chaud. En raison de ses propriétés physiques exceptionnelles (il contamine peu le plasma et retient peu l'hydrogène), on a choisi le **béryllium** comme matériau de revêtement de la première paroi. Le bouclier sera constitué d'inox et de cuivre à haute résistance » [2].



Tokamak ITER

Source, [batirama](http://batirama.com)

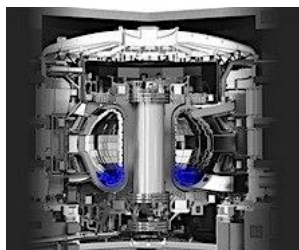


Couverture

Divertor

Un dispositif dit "divertor" est disposé à la base de la chambre à vide. Il a pour fonction d'extraire une partie de la puissance, les impuretés et les "cendres" générées par la fusion sous forme de noyaux d'hélium [rayonnement alpha] » [1].

« Chacune des 54 "cassettes" du divertor est constituée d'une structure en acier inoxydable et de trois éléments, ou "cibles", positionnés face au plasma » : « le **tungstène** (W), un métal hautement réfractaire, a été choisi comme matériau de surface (...). Les 54 cassettes (10 tonnes chacune) seront installées — et également remplacées au moins une fois au cours de la phase opérationnelle d'ITER — par des outils de télémanipulation spécialement conçus pour le programme » [2].

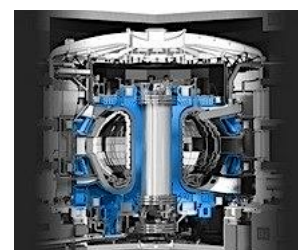


Divertor

Aimants

« Le plasma de deutérium - tritium sera confiné à l'intérieur d'ITER grâce aux champs magnétiques générés par des bobines supraconductrices, placées à l'extérieur de la chambre à vide » [1]

« 10 000 tonnes de systèmes supraconducteurs (dont l'énergie magnétique totale est de 51 Gigajoules) généreront le champ magnétique qui créera, confinerà et modèlera le plasma. Fabriqués en niobium-étain (Nb3Sn) ou niobium-titane (Nb-Ti), les électroaimants deviennent supraconducteurs lorsqu'ils sont refroidis à très basse température. La température de fonctionnement pour les aimants d'ITER est de -269 °C (4°K) » [2].

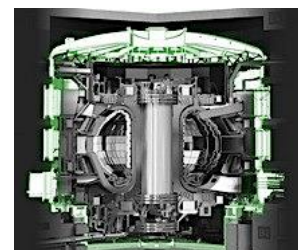


Aimants

Cryostat

« L'ensemble du Tokamak sera enfermé dans un cryostat avec des écrans thermiques placés entre les composants à haute température et les bobines supraconductrices à très basse température. Cet ensemble permet de maintenir les aimants à très basse température » [1].

« Mesurant presque 30 mètres de haut et autant de diamètre, le cryostat a été dimensionné par rapport aux très grands éléments qu'il entoure, dont les bobines de champ poloïdal. Fabriquée à partir de 3 850 tonnes d'acier, la base du cryostat (1 250 tonnes) sera l'élément le plus lourd de la machine ITER » [2].



Cryostat

[1] ITER - [Demande d'autorisation de création](http://www.iter.org/fr/mach/tokamak) - Pièce 2 : Description de l'installation - Iter Organization, 2011

[2] Qu'est-ce qu'un tokamak ? <https://www.iter.org/fr/mach/tokamak>

ITER Organization (IO)

L'Organisation internationale ITER pour l'énergie de fusion (Organisation ITER ou, en anglais, ITER Organization) est une organisation intergouvernementale établie par un accord international conclu par sept parties qui en sont les Membres : la République Populaire de Chine, la Communauté européenne de l'énergie atomique (EURATOM), la République d'Inde, le Japon, la République

de Corée, la Fédération de Russie et les États-Unis d'Amérique » [<https://www.iter.org/fr/legal/status>].

« L'Europe assume la plus grande partie du coût de construction de l'installation (45,6 %) ; la part restante est assumée de manière égale par la Chine, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis (9,1 % chacun). [<https://www.iter.org/fr/proj/Countries>].

Quel est l'objectif essentiel d'ITER ?

Rappels Gazette de septembre 2011 - « Apporter des éléments de réponse à la question de la faisabilité scientifique et technologique de la fusion par confinement magnétique et ouvrir la voie pour le démonstrateur de viabilité, DEMO.

Rappelons que, pour que l'opération de fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium se réalise dans ce type d'installation, il faut des conditions très particulières : envoi d'un grand nombre d'atomes (la densité) l'un contre l'autre, avec la plus grande vitesse possible (la température) et pendant le plus longtemps possible (le temps de confinement). Avec ces trois paramètres a été défini un critère, le **critère de Lawson**, qui doit indiquer à partir de quand le système est censé fonctionner et produire plus d'énergie qu'il en consomme.

Ce qui a été testé sur les machines déjà réalisées c'est la possibilité d'améliorer un des trois paramètres, mais quasiment toujours au détriment d'au moins un des deux autres.

Aujourd'hui les responsables du projet au Commissariat à l'Énergie Atomique, assurent que la plupart des briques technologiques ont été validées sur ces diverses petites machines, et estiment que les risques technologiques se limitent à l'intégration de toutes ces briques. Leur enthousiasme aurait dû être modéré par la lecture d'un rapport présenté devant l'Académie des Sciences fin 2001 par leur ancien Haut-Commissaire Robert Dautray. Il explique que la fission a pu se développer grâce à "la linéarité des phénomènes" car "tous les problèmes scientifiques et techniques sont découplés par la linéarité et peuvent être étudiés à part et simultanément dans des installations modestes". Par contre "la fusion thermonucléaire, au contraire, est un phénomène fondamentalement non-linéaire, et ceci vis-à-vis de toutes les fonctions physiques en jeu... Il faut donc explorer les uns après les autres tous les niveaux de puissance, y découvrir de nouveaux phénomènes...".

Sa conclusion est "... pour le moment la fusion thermonucléaire ne peut pas encore être comptée avec certitude parmi les sources industrielles d'énergie... n'est-ce pas plutôt un sujet d'étude de physique important auquel il faut assurer un soutien constant, persévérant et à long terme, comme on le fait dans bien d'autres domaines de la physique dans le cadre général des recherches".

Cette famille de problèmes se heurte toujours à cette problématique. À un niveau de dimension de la machine donc de puissance, après de longs travaux de recherche, on arrive à obtenir des solutions permettant le fonctionnement. Mais lorsqu'on augmente la taille pour tendre vers la dimension critique de fonctionnement, des

phénomènes perturbatifs qui, à l'échelle inférieure, étaient négligeables deviennent prépondérants et nécessitent de nouvelles et longues études pour parvenir à les maîtriser. C'est le propre des phénomènes non linéaires profondément turbulents.

Il est clair que, pour un physicien, c'est un sujet de recherche passionnant, mais il faut raison garder. Ce n'est pas demain que ce processus physique va contribuer au bilan énergétique de l'humanité ».

A propos des déchets

« Dans des présentations antérieures nous avons pu voir évoquée la notion de remplacement régulier de sections de l'enceinte, aimants compris, suite à l'érosion de cette paroi par divers effets bien connus et identifiés.

Nous avons pu voir que le taux de remplacement serait important, de l'ordre d'un cinquième ou un sixième par an. Chaque morceau présenterait une activité très élevée, et même si les éléments radioactifs présents ont des périodes courtes comparé à celles des transuraniens, leur accumulation au fil des ans ne serait pas sans poser problème. **Il est généralement affirmé que l'activité serait revenue au niveau de la radioactivité naturelle au bout de 300 ans. Cette affirmation prêterait à sourire si elle n'était formulée par des scientifiques de haut niveau.** Il est clair que ce sont les éléments de période radioactive d'une trentaine d'année qui sont les plus pénalisants. Cependant, pour ces éléments, 300 ans correspondent à 10 périodes, donc à une diminution de leur activité par un facteur 1024 (2 puissance 10). L'activité résiduelle dépend uniquement de l'activité d'origine et rien ne permet d'affirmer qu'elle serait négligeable ».

[[Gazette n° 261](#)]

A propos des records de température du plasma

Il y a un effet physique important qui est généralement oublié lorsqu'un record est annoncé. En effet, qui dit température, dit vitesse des ions dans le plasma. Comme la dimension de la chambre à vide est finie, par construction, plus la vitesse augmente plus il va falloir forcer la courbure par le champ magnétique. Les lois de la physique sont féroces : si tu changes la trajectoire d'une particule électriquement chargée (ici le plasma), la conservation de l'impulsion produit une émission de photons gammas, le *bremsstrahlung* (en français le rayonnement de freinage), qui emporte une partie de l'énergie. On peut arriver ainsi à une limite où toute l'énergie supplémentaire injectée est émise par rayonnement. Sans compter que ce coquin de rayonnement va se farcir la paroi et faire de l'érosion (pulvérisation cathodique).

Interview - Benjamin Carreras :
Combiner extrapolation empirique et modélisation
 IRSN, 2012

Quel est le plus grand défi technique lié au plasma ?

L'un des soucis majeurs concerne ce que l'on appelle les disruptions, c'est-à-dire l'apparition brutale d'instabilités du plasma. Dans les tests initiaux, avant la mise en œuvre d'éléments radioactifs, ITER va devoir acquérir une expérience sur la probabilité de ces disruptions et la manière d'en gérer les conséquences.

Comment prédire ces instabilités ?

Il existe des aspects du plasma à étudier sur ITER, dont nous n'avons pas encore une connaissance totale. Nos connaissances reposent sur des machines plus petites qui ne peuvent pas atteindre les températures auxquelles ITER va travailler. Nous ne disposons pas de bases théoriques suffisantes permettant de prédire ou de calculer les différents aspects de la disruption. Pour en évaluer les conséquences, il existe deux moyens : extrapoler à partir des données empiriques des tokamaks actuels ou modéliser le processus, aussi précisément que possible. Mais les deux approches ont des limites.

Pouvez-vous donner un exemple ?

Un problème important consiste à déterminer le temps le plus court mis par le courant pour s'effondrer durant une perturbation. Plus ce délai sera court, plus les conséquences de la disruption seront importantes. Il est donc primordial d'accroître l'analyse des données existantes et le niveau de modélisation de ces événements, en parvenant à des modèles tridimensionnels par exemple, et en même temps de rassembler autant d'informations que possible durant la première phase d'expérimentation pour tester les extrapolations empiriques déjà réalisées.

Benjamin Carreras est un physicien nucléaire américain, spécialiste de la physique du plasma. Il a travaillé dans le laboratoire de recherche pluridisciplinaire Oak Ridge National Laboratory, dépendant du ministère américain de l'Energie.

Actuellement [en 2012] chercheur au sein de deux institutions espagnoles et professeur de physique à l'Université de Fairbanks (Alaska, Etats-Unis), il est aussi consultant pour l'IRSN sur le projet ITER.

[\[IRSN, 2012\]](#)

Nous allons maintenant aborder plus particulièrement la question des déchets nucléaires qui seront générés pendant la durée de l'exploitation d'ITER. Le moins que l'on puisse dire c'est qu'ITER Organization entretient un certain flou sur le sujet. Avant de développer notre analyse, nous publions de larges extraits d'un avis de l'IRSN sur les problèmes de radioprotection soulevés par l'ASN. L'IRSN y souligne des incohérences dans l'estimation de la radioactivité engendrée durant le fonctionnement d'ITER. Certes, cet avis est des plus indigestes, c'est pourquoi nous avons souligné les passages qui nous semblent les plus singuliers.

AVIS IRSN N° 2021-00195 du 8 décembre 2021
Cadarache - ITER - INB n° 174
Cartographies radiologiques

Réf. Lettre ASN CODEP-DRC-2021-012879 du 6 mai 2021

Par lettre citée en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) sollicite l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les dispositions relatives à la fonction de protection contre les rayonnements ionisants définie par l'exploitant ITER Organization (IO), transmises en février 2020 dans le dossier de mise à jour des cartographies radiologiques¹.

L'ASN souhaite notamment que soit examiné le respect des dispositions du décret d'autorisation de création (DAC) de l'installation nucléaire de base (INB) n° 174 (ITER) et du Rapport préliminaire de sûreté (RPrS) accompagnant la demande ayant conduit à cette autorisation.

L'installation ITER, en cours de construction sur le site de Cadarache, a pour objet la réalisation d'expériences de réaction de fusion nucléaire dans des plasmas de tritium et deutérium, maintenus dans un dispositif de confinement magnétique appelé tokamak. Ces expériences visent notamment à tester des concepts et des équipements pour de futurs réacteurs électrogènes mettant en œuvre cette réaction.

L'ASN demande que l'IRSN examine en particulier :

- la méthode générale d'élaboration des cartographies radiologiques pour les trois modes d'exploitation de l'installation, ainsi que les hypothèses et les marges prises en compte (concernant notamment les outils de calcul et de modélisation utilisés, ainsi que les éléments importants pour la protection (EIP) pris en compte par l'exploitant dans sa démonstration) ;
- le traitement des écarts entre les cartographies radiologiques réalisées en 2020 et les études du RPrS ;
- la faisabilité des solutions techniques envisagées pour la résolution des écarts détectés et des concepts considérés (notamment le concept de budget neutronique) par IO.

Pour cette expertise, l'ASN demande à l'IRSN de considérer les critères de dimensionnement de l'installation définis par IO dans le RPrS par analogie au zonage radiologique, en tenant compte des évolutions réglementaires récentes (notamment le décret du 4 juin 2018²).

L'ASN a souhaité que l'instruction du dossier relatif aux cartographies radiologiques soit intégrée à celle, en cours par ailleurs, du point d'arrêt réglementaire « assemblage du tokamak » du DAC, notamment en raison de l'impact potentiel, sur le radier principal, des masses des protections radiologiques supplémentaires qui seraient mises en place pour résorber des écarts détectés dans ce dossier.

De l'évaluation des documents transmis, tenant compte des informations apportées au cours de l'expertise et des engagements pris par IO, présentés en annexe 2 au présent avis, l'IRSN retient les éléments suivants.

1. ANALYSE DE LA MÉTHODE D'ÉLABORATION DES CARTOGRAPHIES RADIOLOGIQUES

1.1. PRÉSENTATION DES MODES D'EXPLOITATION

Trois modes d'exploitation sont définis par IO pour l'installation ITER :

- le mode 0 lorsque le tokamak est en fonctionnement jusqu'à 24 heures après l'arrêt du dernier plasma d'une série ;
- le mode 1 qui fait suite au mode 0 et qui correspond à la phase d'arrêt de l'installation pour maintenance avec présence humaine ;
- le mode 2 qui correspond lui aussi à une phase d'arrêt de l'installation pour maintenance dite « lourde » (des composants très activés devront être déplacés de manière automatique et sans présence humaine).

S'agissant du mode 0, IO précise que la durée de refroidissement de 24 h après la fin du dernier « pulse »³ d'une série pourrait être réduite avant de sortir du mode 0 (et donc de passer au mode 1) si certaines conditions radiologiques étaient satisfaites. Sur ce point, en fin d'expertise, IO s'est engagé (engagement n° 8) à spécifier dans les règles générales d'exploitation (RGE) les critères de sortie du mode 0. **L'IRSN estime que ceci est satisfaisant.**

1.2. CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT

1.2.1. Méthode d'élaboration des critères

Les critères de dimensionnement sont des critères de conception qui s'intègrent dans la démonstration de la maîtrise des expositions aux rayonnements ionisants. En particulier, le type et la volumétrie des protections radiologiques (murs, rebouchage de traversées...) en sont directement dépendants. La définition de ces critères est de la responsabilité de l'exploitant, l'expertise de l'IRSN intégrant l'ensemble de la démonstration.

À cet égard, les valeurs des critères de dimensionnement retenues par IO au stade du RPrS ne sont pas explicitement mentionnées, notamment dans ce dernier. Par ailleurs, depuis le RPrS, IO a fait évoluer à plusieurs reprises ces critères pour justifier le dimensionnement, ce qui sur le principe est critiquable. En plus des évolutions de modélisation des structures de génie civil, des sources et des composants internes, ceci ne permet pas de comparer directement les cartographies radiologiques de 2020 et les études du RPrS.

De la compréhension de l'IRSN du référentiel documentaire d'IO, les critères de dimensionnement pour les trois modes de fonctionnement sont présentés dans le « Safety Roombook ». Certains de ces critères sont issus des limites de zonage de l'« Arrêté zonage » de 2006, définies en termes de doses intégrées sur une certaine durée.

S'agissant des zones non réglementées et surveillées, les critères du « Safety Roombook » correspondent aux limites hautes de zonage définies pour ces zones dans l'« Arrêté zonage » de 2006. Il s'agit de critères définis en termes de doses intégrées respectivement sur un mois et sur une

heure. S'agissant des zones contrôlées vertes et jaunes, les critères du « Safety Roombook » sont définis en termes de débits équivalent de dose (DeD) (respectivement <10 µSv/h et <100 µSv/h) et en termes de « contrainte de dose »⁴. Ces DeD sont plus ambitieux que les valeurs de l'arrêté précité. IO a précisé, au cours de l'expertise, que ces valeurs ont été définies comme des objectifs dans le cadre de la démarche ALARA pour le mode 1, conformément à la notion de « contrainte de dose », et non pas comme des critères de dimensionnement pour le mode 0. Enfin, pour la zone contrôlée orange, le critère du « Safety Roombook » est la limite haute de zonage définie en DeD dans l'« Arrêté zonage » de 2006.

Toutefois, dans son dossier relatif à la mise à jour des cartographies radiologiques, IO justifie non pas le respect des critères du « Safety Roombook », mais celui d'autres critères définis sur la base des limites de zonage radiologique du décret de 2018. Pour ce faire, IO transpose ces limites, définies en doses intégrées sur une certaine durée, en valeurs de DeD. Pour les zones non réglementées, surveillées et contrôlées vertes, IO réalise cette transposition en utilisant la durée de fonctionnement mensuelle prévue de l'installation ITER, la considérant comme le temps effectif d'exposition d'un travailleur sur un mois. Or, pour cette installation, la dose intégrée sur une certaine durée est proportionnelle, entre autres, à la puissance et à la durée du pulse. Aussi, dans la mesure où IO ne formalise pas de limites en termes de nombre de pulses par période (heure, jour, semaine, mois et an) et de durée de pulse par rapport aux puissances envisagées, malgré la mise en œuvre d'un concept de budget neutronique (voir § 1.2.3), il est toujours possible, en modulant ces paramètres, de justifier le respect des critères précités. **Ainsi, pour l'IRSN, les critères définis par IO dans le dossier de 2020, s'appuyant sur des paramètres d'exploitation détaillés pour définir des doses intégrées, ne sont pas adaptés pour le dimensionnement d'une installation, car relevant d'un principe de gestion opérationnelle de la dose.**

En fin d'expertise, IO s'est engagé à fixer dans son référentiel de sûreté des critères de dimensionnement (engagement n° 1) correspondant à des DeD pour toutes les zones. L'IRSN estime satisfaisante cette évolution.

Bien que la définition des critères soit de la responsabilité de l'exploitant, l'IRSN a examiné les valeurs définies par IO dans cet engagement.

1.2.2. Caractère suffisant des critères définis par IO dans son engagement n°1

Tout d'abord, IO indique considérer « la fonction de sûreté relative à la limitation de l'exposition aux rayonnements du Public au titre des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement ». **Pour l'IRSN, l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs doit également être intégrée dans l'établissement des critères de dimensionnement.**

Mode 0

Dans ce mode, les expositions externes proviennent des neutrons induits par la réaction de fusion et des particules secondaires créées par les interactions de ces neutrons

avec les structures notamment. Compte tenu de l'énergie maximale des neutrons (14 MeV), des phénomènes d'activation de la matière sont à prendre en compte. Ainsi, les cartographies présentées par IO correspondent à des débits de dose durant le pulse, les sources considérées étant les neutrons, les γ prompts et les γ issus de la désintégration de l'azote 16.

S'agissant des critères présentés par IO dans l'engagement n° 1 pour les zones non réglementées, surveillées et contrôlées vertes, l'IRSN considère qu'ils ont été calculés en utilisant la méthode, décrite précédemment, de transposition basée sur une durée de fonctionnement mensuelle prévue de l'installation ITER pour définir un DeD (les valeurs du décret de 2018 étant exprimées pour ces zones selon une période mensuelle).

À cet égard, le domaine de fonctionnement d'ITER n'est pas figé dans les documents de sûreté, s'agissant notamment du nombre et de la durée des pulses. Sur ce point, pour l'IRSN, l'activité dite « irrégulière » abordée dans l'instruction n° DGT/ASN/2018/229 du 2 octobre 2018, et utilisée par IO dans son argumentaire relatif au zonage (et notamment au choix de la durée d'exposition), n'est pas applicable compte tenu de l'objectif de l'installation, du nombre de pulses prévu par jour et de la durée de ces pulses. **L'IRSN considère donc que, selon cette instruction de l'ASN, l'activité d'ITER est a minima exercée de manière régulière.**

De plus, en dehors des pulses, l'exposition aux rayonnements ionisants perdure pendant le temps de décroissance des produits d'activation créés par le flux neutronique. D'autre part, l'exposition répétée au flux neutronique intense des équipements et des structures de l'installation peut conduire à une accumulation non négligeable dans le temps des produits d'activation dont la période radioactive est significative, comme le cobalt 60. Dès lors, au fur et à mesure de l'exploitation, ces produits d'activation entraîneront une augmentation progressive du débit d'équivalent de dose d'ambiance de locaux qui doit être prise en compte dans l'élaboration des critères de dimensionnement.

Aussi, l'IRSN estime que la durée d'exposition d'un travailleur correspondante à la durée mensuelle cumulée des pulses, retenue par IO pour définir les critères présentés dans son engagement n° 1, est sous-estimée.

Modes 1 et 2

Pour les modes 1 et 2, l'IRSN considère que les critères en DeD retenus par IO dans l'engagement n° 1 pour les zones non réglementées, surveillées et contrôlées vertes, basés sur une durée mensuelle cumulée des pulses, ne peuvent pas être considérés dans la mesure où ces modes correspondent à des périodes hors pulse dont les sources d'exposition à considérer sont permanentes.

Éléments concernant les trois modes

Pour les zones contrôlées vertes et jaunes, les valeurs définies par IO dans l'engagement n° 1 sont moins ambitieuses que celles du « Safety Roombook » qui affichait l'objectif que « *the limits of the dose rate for ITER facilities are lower than the regulatory values (25 μ Sv/h for*

green zone and 2m Sv/h for yellow zone according to French order of 15/05/06⁵) ».

S'agissant des critères pour les zones contrôlées oranges et rouges, les valeurs retenues par IO dans l'engagement n° 1 d'IO n'ont pas évoluées par rapport aux valeurs mentionnées dans le « Safety Roombook ».

En conclusion, même s'il appartient à l'exploitant de définir les critères de dimensionnement, l'IRSN considère que les valeurs des critères retenus par IO devraient être revues pour tenir compte de la contribution des divers produits d'activation. Pour l'IRSN, IO pourrait retenir, pour la protection du public et des travailleurs, les critères de dimensionnement du « Safety Roombook » pour les valeurs définies en DeD (zone verte : < 10 μ Sv/h ; zone jaune : <100 μ Sv/h ; zone orange : <100 mSv/h et zone rouge : > 100 mSv/h) et, a minima pour les zones non réglementées et surveillée, un DED horaire inférieur à 0,5 μ Sv/h et 7,5 μ Sv/h respectivement.

Pour l'IRSN, la vérification du respect de ces critères devrait être réalisée en considérant des DeD pendant le pulse pour le mode 0 (valeur instantanée), et la présence de sources radioactives permanentes (incluant les produits d'activations) pour les modes 1 et 2. Ces valeurs seraient applicables quel que soit le mode.

1.2.3. Concept de budget neutronique

Dans le dossier « Cartographies radiologiques » de 2020, IO introduit le concept de budget neutronique défini comme une production mensuelle maximale de neutrons. Pour IO, ce budget limite l'utilisation de l'installation ITER et garantit le respect des hypothèses considérées pour l'établissement des cartographies radiologiques.

Pour l'IRSN, bien que tenant compte de la spécificité de l'installation ITER (installation expérimentale effectuant des plasmas ponctuels), ce budget laisse à l'exploitant la possibilité de panacher les expérimentations sur une même période, c'est-à-dire des pulses de différentes puissances et durées. En effet, le flux neutronique est proportionnel, entre autres, à ces paramètres. Ainsi, pour l'IRSN, ce concept de budget neutronique constitue un outil « opérationnel » permettant de démontrer en partie le respect du zonage radiologique de conception, et non pas le respect des critères de dimensionnement. En tout état de cause, IO devrait préciser les modalités d'utilisation du budget neutronique en exploitation, démontrer la faisabilité technique de la mesure associée au budget neutronique, quantifier ses incertitudes et justifier sa représentativité eu égard à l'objectif de quantification du flux neutronique délivrée par les pulses. **IO a pris un engagement (engagement n° 5) sur ce point, ce qui est satisfaisant.**

Par ailleurs, il est à noter que le budget neutronique du dossier précité est environ trois fois supérieur au budget issu des scénarios d'irradiations mentionnés dans le RPrS, qui étaient fondés sur une fluence neutronique totale moyenne de la première paroi en fin de vie de 0,3 MW.an/m². Cette fluence est reprise dans une prescription technique de l'ASN en tant que critère maximal de dimensionnement. **Ainsi, à ce stade, le budget neutronique retenu par IO dans son dossier n'est pas en cohérence avec le respect d'une fluence neutronique**

totale moyenne de la première paroi en fin de vie de 0,3 MW.an/m².

(...)

2. IDENTIFICATION ET TRAITEMENT DES ÉCARTS

Pour rappel, le caractère suffisant des protections radiologiques installées au titre du mode 1 n'a pas été examiné dans le cadre de la présente expertise.

Par ailleurs, la comparaison entre les cartographies radiologiques de 2020 et les études du RPrS est difficile, en raison des évolutions des modélisations et des critères de dimensionnement. Du fait de l'évolution des critères de dimensionnement, l'approche actuelle utilisée par IO, de comparaison visuelle « par couleur » de zonage, ne permet pas d'identifier formellement certains écarts. Ainsi, l'IRSN estime nécessaire qu'IO établisse les comparaisons des critères (en termes de DED et non de dose intégrée) aux valeurs maximales, local par local, y compris pour les bâtiments avoisinants le bâtiment tokamak. IO s'est engagé sur ce point (engagement n° 7). **L'IRSN estime cet engagement globalement acceptable.**

S'agissant du traitement des écarts d'ores et déjà identifiés par IO, la plupart des solutions techniques définies par IO sont au stade de préconcept ou de concept initial. De ce fait, IO ne détaille pas les marges prises dans les études au regard des évolutions pouvant intervenir dans la suite du développement de ces solutions techniques. De plus, les matériaux retenus à ce stade pour intervenir dans certaines solutions sont en phase de développement ; leurs fonctions d'atténuation ne sont donc pas démontrées. **Aussi, à ce stade, l'IRSN ne peut pas conclure quant à la faisabilité technique, à l'efficacité ou à l'impact sur la sûreté des solutions actuellement retenues.**

3. CONCLUSION

Sur la base des documents examinés et en tenant compte des informations apportées au cours de l'expertise par IO, **l'IRSN estime que la méthode générale d'élaboration des cartographies radiologiques et les hypothèses retenues pour sa mise en œuvre dans le dossier de 2020 ne sont pas adaptées dans le contexte du dimensionnement d'une installation. Si l'engagement d'IO de fixer des critères de dimensionnement en DeD [Débit équivalent de dose] est satisfaisant sur le principe, pour l'IRSN, les valeurs retenues ne sont pas**

suffisamment ambitieuses au regard notamment de la flexibilité permise par le concept de budget neutronique introduit par IO et de l'impact des produits d'activation.

Par ailleurs, la mise en œuvre de ce concept, notamment s'agissant des mesures associées, reste à justifier. En outre, les cartographies sont établies en s'appuyant sur une modélisation très détaillée, ne permettant pas de mettre en évidence les éléments importants pour la protection des intérêts. Ce point fait l'objet de la recommandation présentée en annexe 1 au présent avis.

Ainsi, à ce stade, l'IRSN n'est pas en mesure de se positionner sur l'exhaustivité des écarts entre les cartographies de 2020 et les études du RPrS. IO s'est engagé à valider le dimensionnement des protections radiologiques en établissant les comparaisons des critères (en termes de DeD et non de dose intégrée) aux valeurs maximales, local par local. L'IRSN estime ceci satisfaisant.

Enfin, s'agissant du caractère suffisant des dispositions de protection contre les rayonnements ionisants et notamment celles permettant de traiter les écarts d'ores et déjà identifiés, l'IRSN estime que leur niveau de développement ne permet pas, à ce stade, de conclure quant à leur faisabilité technique, à leur efficacité ou à l'impact sur la sûreté des solutions actuellement retenues.

Notes

- 1 - Les cartographies radiologiques correspondent à une spatialisation des résultats de calculs de débit d'équivalent de dose.
 - 2 - La réglementation en vigueur lors de la rédaction du RPrS en 2010 (« Arrêté zonage » de 2006) a été modifiée par le décret du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants. En particulier, les limites définissant les zones surveillées et les zones contrôlées vertes sont désormais définies en termes de dose intégrée sur un mois.
 - 3 - Réalisation d'un plasma à une puissance donnée sur une certaine durée.
 - 4 - Contrainte de dose : restriction définie par l'employeur à titre prospectif, en termes de dose individuelle, utilisée pour définir les options envisagées à des fins d'optimisation de la protection des travailleurs.
 - 5 - « Arrêté zonage » de 2006.
- [Pour les annexes, voir le lien [AVIS IRSN N° 2021-00195](#)]

Analyse GSIEN

Longum est iter

(Le chemin est long, en latin)

A la suite de l'expertise de l'IRSN, l'ASN a informé par courrier l'Organisation internationale ITER qu'elle ne lèverait pas le « point d'arrêt "assemblage tokamak" », l'assemblage de la chambre à vide étant « soumis à l'accord préalable de l'ASN ». Elle a adressé un courrier le 25/01/22 au directeur général. Voici les éléments relevés par l'ASN :

« - les valeurs de « budget neutronique » que vous prévoyez au cours du fonctionnement de l'installation sont supérieures à la fluence neutronique maximale à prendre en compte pour le dimensionnement de l'installation ;

- les éléments transmis concernant les cartographies radiologiques ne permettent pas de démontrer la maîtrise de la limitation de l'exposition aux rayonnements ionisants, enjeu majeur pour une installation de fusion nucléaire. En particulier, l'activation progressive des matériaux sous l'effet du flux neutronique intense n'est pas correctement prise en compte et l'exposition des travailleurs dans les locaux attenants aux bâtiments nucléaires doit être évaluée avec des hypothèses réalistes prudentes, (...) ;

- la conception des dispositifs de blindage radiologique, afin d'assurer la protection des travailleurs et du public, n'est pas

finalisée. Or les protections radiologiques, par leurs masses, ont un impact sur le supportage du tokamak et doivent être prises en compte dans la démonstration de sûreté ;

- vous avez signalé des incertitudes importantes concernant la quantité de **produits de fission** [Souligné par nous - Cf. page 13] mobilisables en situation accidentelle, ce qui a des conséquences, non encore évaluées, sur la maîtrise des risques associés à la production de poussières, la conception et l'efficacité des systèmes de confinement dynamique et de détritiation, ainsi que, plus globalement, concernant les fonctionnements normal et accidentel de l'installation (rejets, déchets...). Ces sujets pourraient conduire à des modifications de conception de systèmes associés à la chambre à vide, ayant des conséquences sur les masses et la tenue du génie civil ;

- à ce jour, n'ont pas été intégrés dans la modélisation du comportement du génie civil :

- la répartition et l'évolution des masses liées aux évolutions de conception que vous avez apportées, notamment ces derniers mois, à l'installation, et de celles que vous allez apporter pour traiter les points ci-dessus,
- les désordres déjà constatés sur l'installation, tels que le décollement du radier par rapport à certains appuis parasismiques ;

- dans votre modélisation du comportement du génie civil, vous n'avez pas pris en compte certains phénomènes, tels que le séisme de niveau « noyau dur » ou des combinaisons de chargement spécifiques (par exemple, la combinaison du chargement thermique et de surpressions en lien avec un relâchement total d'hélium) ;

- les deux premiers secteurs de la chambre à vide réceptionnés sur site sont affectés de non-conformités dimensionnelles. De ce fait, l'adéquation des méthodologies que vous envisagez actuellement pour la réalisation puis le contrôle de ces soudures n'est pas garantie ».

(...)

En conséquence, l'assemblage du tokamak ne peut être engagé » [ASN, 25 janvier 2022].

« Qu'est-ce qu'un "point d'arrêt" ? ». C'est à la rubrique Actualité de son site Internet, qu'ITER Organization communique sur le sujet le 28 février 2022 : « ITER accorde une grande attention aux prescriptions de l'ASN et observe de manière particulièrement rigoureuse la réglementation de sûreté nucléaire » [IO, 28/02/22].

L'ASN ayant refusé de lever le point d'arrêt "assemblage tokamak", en toute logique le chantier aurait dû s'arrêter : c'est à ça que servent les points d'arrêt. Et le A d'ASN signifie Autorité ! Excusez-nous l'expression, mais si le président de l'ASN, Bernard Doroszczuk qui a signé le courrier, avait pissé dans un violon cela aurait eu le même effet. ITER Organization a tout de même engagé les travaux d'assemblage, sans l'accord de l'ASN. Dans son communiqué de presse du 30 mai 2022, IO indique : « En positionnant dans le puits d'assemblage du tokamak le premier « module » de la chambre à vide, le programme ITER a franchi le 11 mai 2022 une étape majeure dans la séquence d'assemblage de la machine » [IO, 30/05/22]. Le GSIEN a contacté l'ASN en septembre 2022 pour savoir si elle avait, entre-temps, levé le point d'arrêt. Ce n'était pas le cas. ITER Organization semble avoir adopté l'attitude consistant à mettre devant le fait accompli le gendarme du nucléaire, comme le font d'autres exploitants nucléaires d'ailleurs...

A l'instar de l'EPR de Flamanville 3, le maître d'œuvre rencontre des problèmes de construction comme des désordres dans le génie civil et des soudures affectées de non conformités ; il rencontre également des problèmes de conception avec une sous-estimation de la fluence et de l'activation des matériaux, ce qui peut être gênant pour la radioprotection (protections biologiques à renforcer) et pour évaluer les rejets et déchets radioactifs qui seront générés par le fonctionnement d'ITER.

L'ASN n'avait pas réussi à faire arrêter le chantier malgré notamment la présence avérée de non-conformités. Mais l'accumulation de ces dernières et les graves défauts constatés ont obligé ITER Organization à suspendre les travaux fin 2022. A priori, plusieurs années de retard sont à envisager et combien de milliards d'euros de surcoût ? Récit des derniers déboires en date.

Des éléments essentiels devront être réparés

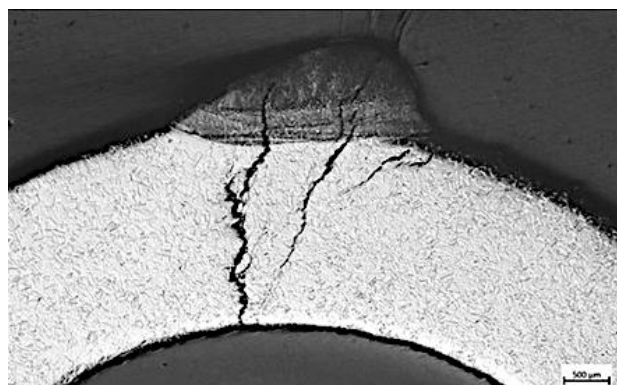
ITER Organization, 21 novembre 2022

« Deux ans et demi après le début de la phase d'assemblage de la machine, ITER est aujourd'hui confronté à une situation de ce type : des défauts ont été identifiés sur deux types de pièces essentielles au fonctionnement du tokamak, les écrans thermiques et les secteurs de la chambre à vide.

(...)

Au mois de novembre 2021, des tests d'étanchéité à l'hélium ont mis en évidence des fuites au niveau d'un élément de l'écran thermique de la chambre à vide qui avait été réceptionné un an et demi plus tôt. (...) Les fuites étaient dues à un double phénomène : des contraintes générées par le cintrage des tubulures du circuit de refroidissement et par leur soudage sur les panneaux de l'écran thermique, conjuguées à une lente réaction chimique causée par la présence de résidus de chlore¹ dans de petites zones proches des soudures. Cette réaction a provoqué ce que l'on appelle une « fissuration par corrosion sous contrainte » et, au fil du temps, des fissures atteignant 2,2 millimètres de profondeur se sont développées dans les tubulures [Cf. photo ci-dessous].

(...)



Tubulure de refroidissement de l'écran thermique
Fissure de 2,2 mm sur toute l'épaisseur du tube

Source, iter.org

S'il semble établi que cette défaillance de l'écran thermique est principalement due à un défaut de conception du système de fixation, qui empêche d'éliminer totalement les résidus de chlore lors des opérations de rinçage, les défauts

constatés sur les secteurs de la chambre à vide relèvent d'une problématique de fabrication industrielle plus courante : les déformations générées par les processus de soudage, aggravées par la complexité structurelle des secteurs de la chambre à vide du Tokamak.

Comme pour tout objet technologiquement complexe, la fabrication des éléments du Tokamak ITER fait appel à la conception tridimensionnelle assistée par ordinateur (CAO 3D). Au stade de la conception 3D, les dimensions d'un composant sont par définition nominales (théoriques) et les pièces s'ajustent les unes aux autres comme les rouages d'une montre de luxe. Mais les choses sont différentes dans la réalité industrielle : des écarts apparaissent inévitablement pendant le processus de fabrication et peuvent aboutir à des « non-conformités » qu'il faudra ensuite corriger. Comme tous les grands programmes industriels, ITER est quotidiennement confronté à ce type de problématique.

(...)

Dans le cas des trois secteurs de chambre à vide déjà livrés, le soudage des quatre segments qui les composent a modifié en différents points de la coque externe les dimensions nominales au-delà de la tolérance prévue. Ces non-conformités dimensionnelles ont altéré la géométrie des surfaces de jonction au niveau desquelles les secteurs doivent être soudés entre eux, compromettant l'accès et les fonctionnements des outils de soudage automatisé, spécialement conçus à cette fin.

En dépit des diverses activités en cours dans l'espace restreint de la fosse d'assemblage et des risques de contamination par des poussières, des solutions de réparation in situ, sans extraire le module de chambre à vide de son emplacement actuel, ont tout d'abord été envisagées. « Le problème rencontré avec l'écran thermique a changé la donne, indique le directeur général d'ITER. Dans la mesure où nous devons démonter le module pour réparer les tubes de l'écran thermique, la question de réparer le secteur de chambre à vide à l'intérieur ou à l'extérieur de la fosse ne se pose plus. Nous n'avons pas d'autre solution que de l'extraire. »

Tandis que les équipes affinent les stratégies de réparation des deux éléments, qu'elles définissent un planning et évaluent les coûts, la séquence d'assemblage de la chambre à vide est suspendue. « Nous savons ce que nous devons faire et comment le faire, et nous sommes parfaitement conscients des conséquences de ces opérations sur le calendrier et les coûts... et elles ne seront pas négligeables ».

Note

1 Avant d'être recouverts d'une fine couche d'argent, les panneaux de l'écran thermique sont nettoyés à l'acide chlorhydrique et revêtus de nickel. C'est au cours de ce processus que des résidus de chlore ont été piégés dans de petites poches à proximité des soudures des tubulures, provoquant une lente corrosion du matériau.

[Actu ITER, 21/11/22].

Selon Médiapart, « Les experts parlent d'un milliard d'euros et d'au moins deux ans de retard, qui s'ajoute au délai supplémentaire de 35 mois accordé par le conseil ITER, en

raison des incidences de la crise sanitaire et de la guerre en Ukraine » [Médiapart, 24/11/22].

Début 2023, ITER Organization a évalué la besogne. Pour les tubulures fissurées : « Les équipes ont décidé de démonter et de remplacer les 23 kilomètres de tubulures de refroidissement installées sur les écrans thermiques.

(...)

La direction d'ITER considère que les fissures des tubulures du circuit de refroidissement pourraient procéder d'un problème systémique affectant l'ensemble des écrans thermiques, y compris la partie basse du bouclier thermique du cryostat qui a déjà été installée. Dans l'environnement très encombré du puits d'assemblage, l'extraction de cette pièce s'avèrerait très difficile. Il a donc été décidé de la laisser en place et de substituer à son circuit de refroidissement d'origine un nouveau réseau de tubulures ».

Pour les secteurs de la chambre à vide affectés de « non-conformité dimensionnelles », le bricolage semble envisagé : « De manière très schématique, il s'agit maintenant de combler les creux et de raboter les bosses afin de rétablir la géométrie nominale et être à même de souder les secteurs les uns aux autres. « L'usinage est la meilleure solution, le dépôt de métal est un peu plus risqué, explique Brian Macklin. Il faudra combiner les deux techniques et nous faisons de notre mieux pour mettre au point une solution adaptée. Les réparations ne pourront commencer qu'une fois que la procédure de dépôt de métal sera entièrement qualifiée.

La quantité de matériau de comblement prévue n'est pas négligeable : environ 73 kilos pour le secteur 6 (déjà installé dans le puits d'assemblage), 100 kilos pour le secteur 1(7) et 400 kilos pour le secteur 8, qui est le plus affecté des trois » [Actu ITER, 09/01/23].

Nous ne savons pas si l'apparition de fissures est liée à un problème de soudage mais l'ASN vient d'informer « de la détection de falsification de qualifications de soudeurs » dans un compte-rendu d'inspection d'ITER : « une analyse de l'impact a été engagée et des fiches de non-conformité ont été ouvertes » [ASN, 04/05/23].

Produits de fission et béryllium

Quand l'ASN évoque des « incertitudes importantes concernant la quantité de **produits de fission mobilisables** », le GSIEN estime qu'il faut comprendre sous-estimation grossière des produits de fission mobilisables.

Nous avons donc un réacteur de fusion de noyaux d'atomes légers qui va tout de même fabriquer des produits de fission de noyaux d'atomes lourds. Cela est rendu possible par la présence de matière fissile (uranium), à l'état de trace, dans le béryllium constituant la première paroi de la couverture de la chambre à vide du tokamak. Comme son fonctionnement va générer quantité de neutrons, la matière fissile pourra fissionner mais aussi s'activer : il y aura donc des produits de fissions mais également des produits d'activation (transuraniens) comme le ²³⁹Pu (T 24 100 ans) dans les déchets radioactifs d'ITER.

Extrait de l'Étude d'impact de la « demande d'autorisation de création de l'installation expérimentale ITER » : « L'installation ITER n'est pas supposée produire des

nucléides émetteurs alpha. Pour éviter un risque de présence de traces d'actinides dans les matériaux faisant face au plasma, ITER met en œuvre des spécifications exigeantes relatives à la teneur en actinides dans les matériaux utilisés, en particulier pour le béryllium (moins de 30 ppm d'U dans Be), qui aboutiraient à l'émission d'actinides au niveau de la cheminée à des niveaux de concentration très faibles (moins de 0,0001 Bq/m³) » [DAC ITER, 2011, Cf. Pièce 6 - page 119].

En clair, le béryllium utilisé dans la première paroi du tokamak devrait avoir une teneur en uranium (U) limitée à 30 ppm maxi. Mais, comme il restera tout de même de l'uranium dans le béryllium, il va être délicat de prétendre éviter un risque de présence de traces d'actinides dans la couverture du tokamak.

Jointe au téléphone par le GSIEN, l'ASN a bien confirmé la présence d'uranium dans le béryllium d'ITER. D'après nos recherches, le béryllium utilisé proviendrait de trois pays : USA, Russie et Chine. Le tableau ci-dessous résume la teneur en uranium du béryllium en fonction de son origine.

Béryllium utilisé dans le blindage de la première paroi d'ITER				
Origine	Nuance	Teneur en uranium (wppm ou mg/kg)		
		Moyenne	Mini	Maxi
USA	S-65C	32	< 30	85
Russie-Kazakhstan	DShG-200	5,2	0,16	18
Chine	CN-G01	15	/	< 20
Sources, Kolbasov et al, 2013 Xiaofang Luo et al, 2020				

Dans le compte-rendu du 11^{ème} atelier international de l'AIEA sur la technologie du béryllium (Barcelone, septembre 2013), la publication de trois scientifiques russes de l'institut Kurchatov de Moscou présente « Quelques réflexions sur les ressources en béryllium, les impuretés qu'il contient et la nécessité de sa détritiation après irradiation ». Les recherches russes ont évalué l'activité radioactive des transuraniens (familles des actinides) : « Pour une concentration initiale de U dans le Be d'ITER égale à 30 wppm [mg/kg], il y aura $U_{tot} = \sim 370$ g de U naturel, dont environ 2,7 g de ²³⁵U, dans 12,3 t de Be de la première paroi d'ITER. À la fin de la période d'exploitation de 20 ans d'ITER (pour une fluence de neutrons de fusion de 0,3 MW/an/m² à travers la première paroi), environ 2 % de ²³⁸U et environ 10 % de ²³⁵U auront fissionné, environ 8 g de ²³⁹Pu et d'autres nucléides transuraniens fissiles plus environ 180 mg de produits de fission se seront accumulés. L'enrichissement du combustible fissile égal à ²³⁵U + ²³⁹Pu + ²⁴¹Pu/ U_{tot} sera de $\sim 2,5\%$ ».

(...)

L'activité spécifique du béryllium d'ITER, pour une concentration initiale d'U de 30 wppm et une fluence de neutrons de fusion à travers la première paroi de 0,3 MW-an/m² à l'arrêt d'ITER, sera de l'ordre de 20 GBq/g, principalement en raison de la présence de ⁶He et d'autres isotopes à vie courte. Un jour après l'arrêt du réacteur, l'activité spécifique du Be sera ramenée à ~ 533 kBq/g (97 % dus au ³H et 3 % dus aux isotopes transuraniens et au ⁶⁰Co).

Après 100 ans de refroidissement, l'activité spécifique sera de ~ 10 MBq/g, dont 82% dus aux isotopes transuraniens » [Kolbasov et al, 2013 - Cf. page 103].

A titre de comparaison, la radioactivité naturelle des sols en France est de l'ordre de 0,4 à 8 Bq/g selon que l'on est en sol sédimentaire ou en sol granitique.

Ces valeurs d'activité sont estimées pour une teneur moyenne en uranium dans le béryllium de 30 mg/kg. Ils sont à pondérer en fonction de la provenance du béryllium. Si la première paroi du tokamak doit être remplacée deux ou trois fois durant la vingtaine d'années prévue de son exploitation, cela divisera par 2 ou 3 l'activité massique mais augmentera d'autant la masse de déchets radioactifs de béryllium.

Un article du Journal of nuclear materials, à propos de l'Activation du béryllium dans une [hypothétique] centrale à fusion, communique sur l'activation de l'isotope naturel ⁹Be. « A l'arrêt, (...) et après quelques minutes, les seuls radionucléides significatifs restants sont ³H et ¹⁰Be » [Forty et al, 1998]. L'isotope radioactif ¹⁰Be, produit par absorption neutronique du ⁹Be, est un émetteur bêta pur avec une période de près de 1,4 millions d'années...

Sous l'impact des neutrons, la couverture d'ITER va s'activer et devenir un déchet radioactif, mais elle va aussi s'effriter ce qui explique la nécessité de son remplacement périodique.

Des poussières de béryllium vont donc être produites dans l'installation, des poussières hautement toxiques. Dans sa fiche toxicologique, l'INRS signale un « Risque avéré d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée ». « Des Valeurs limites d'exposition professionnelle [VLEP] contraignantes dans l'air des lieux de travail ont été établies en France pour le béryllium et ses composés » : « 0,0002 mg/m³ » d'air inhalé avec une curieuse mesure transitoire de « 0,0006 mg/m³ jusqu'au 11 juillet 2026 », soit 0,6 µg/m³. « Pour rappel, en 2010, l'Anses recommandait de fixer, pour le béryllium et ses composés, une VLEP (8 heures) à 0,01 µg/m³ » [INRS, mars 2022].



Quelles précisions sur la toxicité du béryllium avec le BRGM : « Le béryllium est un métal non radioactif très toxique. Il est classé parmi les éléments les plus toxiques comme l'arsenic, le cadmium, le chrome, le plomb et le mercure. Le béryllium agit comme un poison cancérigène, affectant les membranes cellulaires et se liant à certaines protéines régulatrices dans les cellules. Le béryllium peut rester détectable dans l'urine jusqu'à 10 ans après l'exposition.

(...)

L'inhalation de "grandes" concentrations de béryllium (plus de 1 mg/m³ d'air), ou une inhalation prolongée (plus d'une dizaine d'années) même de très faibles doses, peut engendrer une maladie nommée maladie chronique du béryllium ou béryllose. Cette maladie affecte les poumons ; elle présente de nombreux points communs avec la pneumonie et peut évoluer vers une insuffisance cardiorespiratoire grave » [BRGM, 2010].

Dans l'Union Européenne, selon l'INRS, « *Le béryllium et ses composés sont classés cancérogènes catégorie 1B* » soit une substance dont le potentiel cancérogène pour l'être humain est supposé. Le Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST) est plus catégorique : « *Le béryllium est également un cancérogène connu, des cancers du poumon associés au béryllium étant de plus en plus souvent déclarés. Cette substance est classifiée dans le Groupe 1 - Cancérogènes pour l'humain, par le Centre international de Recherche sur le Cancer (IARC), et dans le groupe A1 - Cancérogène humain confirmé, par l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)* » [CCHST, 2017].

Déchets radioactifs

On peut lire parfois dans la presse que la fusion nucléaire serait une « *énergie propre* » et « *sans déchets nucléaires* » : « *le Graal écologique* ». [Le Point 24/04/22]. Ce n'est que propagande grossière.

La propagande est parfois plus nuancée : « *Contrairement à la fission, la fusion ne produit pas en elle-même de déchets radioactifs à vie longue (seuls les neutrons libérés par la réaction peuvent éventuellement être capturés par les matériaux du réacteur et les rendre radioactifs)* » [Pour la Science, 30/03/22].

Le fonctionnement d'ITER va générer des déchets d'activation et quantités de tritium, carbone 14, etc. qu'il va bien falloir gérer. Dans un avis, l'ASN donne un ordre de grandeur de la quantité de déchets tritiés : « *environ 30 000 m³ de déchets pour une activité radiologique en tritium de 35 000 TBq* » [ASN, 11/05/21].

Déchets d'activation

« *Les neutrons activent les structures métalliques du tokamak. Ces structures activées sont une source de déchets qui s'ajoutent aux déchets tritiés. Le volume total de déchets sera plus important que celui d'un réacteur actuel mais n'aura pas une haute activité. Par ailleurs, ces structures métalliques activées conduisent à des débits de dose tels que toute intervention humaine est impossible. Il faut robotiser toutes les opérations de maintenance* » [Expo IRSN, 2017].

Dans son dossier sur « *L'installation expérimentale ITER* » (juillet 2012), l'IRSN donne un ordre de grandeur de l'activité des « *produits d'activation* » du Graal écologique : « *environ 10²⁰ Bq après 20 ans d'exploitation* » [IRSN, 2012]. Pour mémoire, l'accident de Tchernobyl a rejeté dans l'environnement de l'ordre de 1,2.10¹⁹ Bq.

Le site Internet d'ITER communique sur la nature des déchets radioactifs produits par le tokamak : « *Les réacteurs de fusion nucléaire ne produisent pas de déchets radioactifs de haute activité à vie longue. L'activation des composants d'un réacteur de fusion est suffisamment faible pour que les matériaux puissent être recyclés ou réutilisés dans les 100 ans qui suivent la mise à l'arrêt de l'installation* » [Avantage de la fusion].

Déchets à vie longue

En même temps, l'Agence ITER France fournit des indications plus réalistes sur la gestion des déchets d'ITER :

« **Les déchets faiblement et moyennement radioactifs à vie longue (supérieure à 30 ans) seront traités, conditionnés et entreposés dans le cadre des filières qui seront mises en œuvre pour ce type de déchets, conformément à la réglementation. ITER ne produira aucun déchet de haute activité** » [Itercad.com].

Pas de déchets de haute activité (HA) dans la communication officielle mais tout de même des déchets de moyenne activité à vie longue. Dans un « *Doc-référence* » sur les « *Réacteurs nucléaires de fusion* », l'IRSN évoque le « *Bâtiment cellules chaudes de l'installation ITER* » dans lequel seront entreposés ces « **déchets radioactifs de moyenne activité à vie longue (MA-VL)** » et les déchets tritiés » [IRSN, 2017].

Définition des déchets MA-VL selon l'Andra : « *activité de l'ordre d'un million à un milliard de becquerels par gramme* » et « *qui contiennent une quantité importante de radionucléides dont la période est supérieure à 31 ans* » ; « *Ils se caractérisent par une présence significative de radionucléides à vie longue comme le nickel 63 (période 100 ans)* ».

Les déchets de haute activité (HA) sont définis par l'Andra par une « *activité [a minima] de l'ordre de plusieurs milliards de becquerels par gramme* » [Andra].

Le nickel 63 est produit par l'activation neutronique du nickel 62 stable qui ne représente que 3,6% des isotopes stables du nickel présent dans l'acier inoxydable de structure interne du tokamak. Il est bien mentionné dans « *Les principaux isotopes d'activation* » du rapport d'« *Évaluation complémentaire de la sûreté d'ITER* » [ECS] mais sans aucune estimation d'activité massique.

A l'inverse, « *pour la poussière de tungstène* », les activités des radioéléments à vie courte des « *principaux isotopes d'activation du tungstène* » sont renseignées avec des valeurs allant de la plus faible, « *3,72E+05 Bq/g* » pour l'argent 110m (T=250 jours) à la plus élevée, « *1,04+E11 Bq/g* » pour le tungstène 187 (T=1 jour), « **à l'arrêt du plasma** ».

Pour la « *gestion des déchets* », l'inventaire des « *Principaux isotopes d'activation* » liste les éléments radioactifs présents dans les matériaux de construction, « *un an après l'arrêt du plasma* » [ECS ITER, 2012 - pages 22 & 23]. Cette liste de radioéléments se révèle bien maigre. Hormis le nickel 63, on n'y trouve aucun autre isotope à vie longue.

L'inventaire présent dans la « *Demande d'autorisation de création de l'INB ITER* » [DAC, 2011 - Cf. Pièce 6] est un peu plus étoffé : en sus du nickel 63, on trouve, présents dans l'acier inoxydable, le nickel 59 (T=76 000 a), le molybdène 93 (T=4 000 a) et le Niobium 94 (T=20 000 a). Ce qui est bien fâcheux quand on communique sur la réutilisation des déchets radioactifs d'ITER au bout d'un siècle...

Nous avons synthétisé dans un tableau (cf. ci-après) les isotopes déclarés par ITER Organization, **un an après l'arrêt du plasma**, dans le dossier de « *Demande d'autorisation de création de l'INB ITER* » et dans le rapport d'« *Évaluation complémentaire de la sûreté d'ITER* ».

ITER - Principaux isotopes d'activation 1 an après l'arrêt du plasma			
Matériaux Alliages	Isotopes déclarés		Période radioactive
	DAC 2011	ECS 2008	
Tungstène	¹⁸⁵ W	¹⁸⁵ W	75,1 j
	¹⁸¹ W	¹⁸¹ W	121,2 j
		¹⁸⁴ Re	38 j
		^{184m} Re	169 j
	¹⁸² Ta	¹⁸² Ta	114,6 j
		¹⁷⁹ Ta	1,82 a
Cuivre	⁶⁵ Zn	⁶⁵ Zn	244 j
	⁶³ Ni	⁶³ Ni	98,7 a
	⁶⁰ Co	⁶⁰ Co	5,27 a
	³ H	³ H	12,3 a
Acier inox	⁹⁴ Nb		20 000 a
	⁹³ Mo		4 000 a
	⁶³ Ni	⁶³ Ni	98,7 a
	⁵⁹ Ni		76 000 a
		⁵⁹ V	75 ms
	⁶⁰ Co	⁶⁰ Co	5,27 a
	⁵⁸ Co	⁵⁸ Co	70,85 j
	⁵⁷ Co	⁵⁷ Co	271,8 j
	⁵⁵ Fe	⁵⁵ Fe	2,75 a
	⁵⁴ Mn	⁵⁴ Mn	312,2 j
Béryllium	⁵⁶ Mn		2,6 h
		⁵⁵ Fe	2,75 a
	³ H	³ H	12,3 a
On peut s'interroger sur la présence de l'isotope de vanadium ⁵⁹ V qui, avec une période de 75 ms subsisterait un an après l'arrêt du plasma...			
Sources, Demande d'autorisation de création - Cf. Pièce 6 : Étude d'impact - Iter Organization, 2011 ECS ITER, 2012 - pages 22 & 23]			

En 2011, lors de « la demande d'autorisation de création de l'installation expérimentale ITER », l'IRSN a fait son expertise. Dans la synthèse de son rapport, au paragraphe « Concernant l'inventaire des matières radioactives dans l'installation », l'institut « a estimé que l'exploitant devait poursuivre les calculs d'activation engagés afin de disposer, pour les principaux équipements, d'inventaires détaillés des différents radionucléides. Ceci permettra d'estimer, d'une part les risques liés à l'exposition aux rayonnements ionisants à chaque poste de travail, d'autre part de caractériser plus précisément les déchets produits et ainsi de pouvoir s'assurer de leur possible évacuation vers les filières d'élimination des déchets ». Dans la conclusion du rapport, l'IRSN indique que « les compléments attendus, qui doivent conforter la conception de l'installation et sa démonstration de sûreté, sont à transmettre avant le début de la phase d'assemblage des équipements du tokamak, soit vers 2015 » [\[IRSN, 2011\]](#) - cf. page 3].

Six années n'auront pas suffi à ITER Organization pour répondre aux demandes complémentaires de l'IRSN. En 2017, l'institut publie un rapport sur les « Réacteurs nucléaires de fusion » et donne son « Avis sur la sûreté et la radioprotection » d'ITER. « Concernant l'inventaire des matières radioactives dans l'installation », on retrouve la même demande qu'en 2011, à la virgule près : « L'IRSN a estimé que l'exploitant devait poursuivre les calculs

d'activation engagés afin de disposer, pour les principaux équipements, d'inventaires détaillés des différents radionucléides. Ceci permettra d'estimer, d'une part les risques liés à l'exposition aux rayonnements ionisants à chaque poste de travail, d'autre part de caractériser plus précisément les déchets produits et ainsi de pouvoir s'assurer de leur possible évacuation vers les filières d'élimination des déchets » [\[IRSN, 2017\]](#) - cf. page 86].

Nous avons contacté l'ASN pour savoir si, cinq années plus tard (en 2022), ITER Organization avait finalisé son inventaire de radioéléments activés. En septembre 2022, l'ASN n'avait toujours rien reçu et elle ne nous a pas caché que l'exploitant manquait de transparence sur le sujet...

Nous allons maintenant aborder la question de l'argent. Pas le *pognon de dingue* que coûte et coûtera ITER mais du métal présent dans le bouclier thermique. L'argent stable est constitué environ pour moitié d'argent 107 (51,35%) et d'argent 109 (48,65%) [\[Fiche IRSN\]](#). Le grand frère, l'argent 110m produit de l'activation neutronique de l'argent 109, voit sa présence mentionnée dans les futurs déchets radioactifs de poussières du tungstène d'ITER. Avec une période de 250 jours il n'est pas vraiment pénalisant en termes de gestion des déchets sur le long terme. Par contre, le petit frère, l'argent 108m, issu de la transmutation de l'argent 107, n'est pas cité dans les modestes inventaires d'ITER (DAC et ECS) alors qu'il a une période radioactive de 438 années.

Le « comportement du tungstène sous irradiation » dans les « réacteurs de fusion » a fait l'objet d'une thèse (Moussa Sidibe, 2014) sous la direction du CNRS. Détails des constituants de la chambre à vide du tokamak : « Dans le cas d'ITER, trois matériaux ont été retenus pour constituer la chambre à vide du réacteur : le béryllium (Be), les composites à fibres de carbone (CFC) et le tungstène (W). (...)

Parmi toutes les impuretés possibles, le carbone (C) et le Molybdène (Mo) sont des impuretés natives trouvées dans le tungstène, leur présence étant liée à la technique de préparation.

(...)

Défauts induits par irradiation dans le tungstène

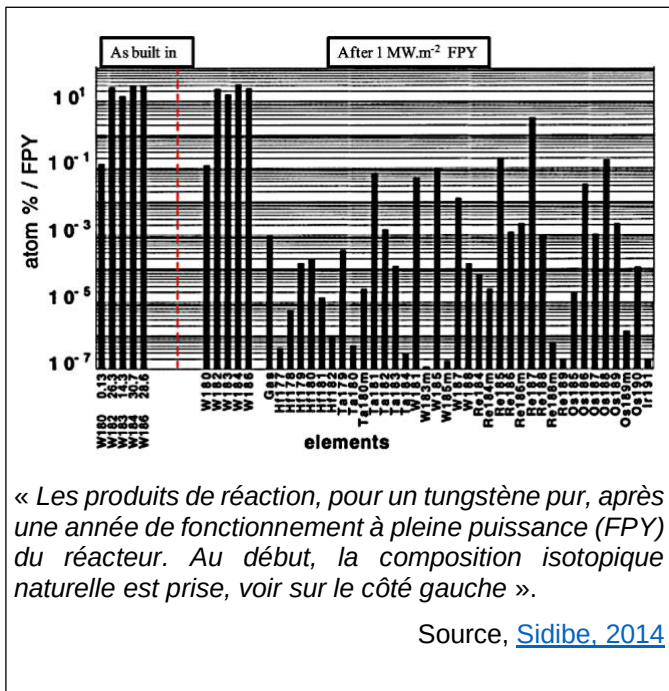
La plupart des matériaux qui seront utilisés dans les réacteurs mettant en œuvre la fusion nucléaire entre le deutérium et le tritium seront exposés à des neutrons de 14.1 MeV et aux flux de particules alpha de 3.5 MeV, qui quittent le plasma. Il est prévu que la puissance délivrée par les neutrons de 14 MeV sur les matériaux de couverture de l'enceinte sera d'environ 1 MW/m² pour une année de fonctionnement du réacteur ITER. Cela correspond à une fluence de neutrons de 1.4x10²⁵ n.m⁻².

(...)

La transmutation des atomes dans le matériau par réactions nucléaires conduira à l'activation du matériau et à la création d'atomes tels que le hafnium (Hf), le tantale (Ta), le rhénium (Re), l'osmium (Os), l'iridium (Ir) et leurs isotopes » [\[Sidibe, 2014\]](#).

En 2019, Alan Durif cite dans sa thèse la transmutation du tungstène en rhénium : « Le Rhénium présente une demi-vie longue (>milliard d'années) et par conséquent induit des problématiques importantes concernant le retraitement de déchets radioactifs » [\[Durif, 2019\]](#).

L'auteur évoque probablement là le rhénium 187 qui, avec une période de 43 milliards d'années, peut être considéré comme un élément quasi-stable. Par contre, le rhénium 186m sera bien plus impactant pour la gestion des déchets radioactifs. En effet, avec une période de 200 000 ans, cet isotope métastable entre incontestablement dans la classification des déchets à vie longue. Si ITER Organization indique la présence de tantale 182 dans les *principaux isotopes d'activation du tungstène* (Cf. Tableau page précédente), le rhénium 186 métastable est oublié alors qu'il sera produit en plus grande quantité (que 182Ta) comme le montre la figure ci-dessous.



Quant à la consommation du tungstène, un rapport du BRGM nous éclaire : « Du tungstène métal sera utilisé pour le revêtement du « divertor » qui constitue le « plancher » du réacteur ITER, en contact direct avec le plasma. Le démarrage devrait se faire avec un « divertor » en composite carbone / fibre de carbone et tungstène, puis il est prévu de généraliser le tungstène en une deuxième phase, ce qui représenterait plus de 100 t de tungstène, à renouveler périodiquement » [[BRGM, juillet 2012](#)]. Cela va en faire des déchets radioactifs à vie longue...

La présence importante de tritium dans les déchets va poser de gros problèmes de gestion. En effet, ils ne répondent pas « aux critères d'acceptation de l'ANDRA, en raison de leur teneur en tritium et de leur taux de dégazage » [[DAC, 2011](#)].

Selon l'IRSN, à l'issue de la période d'exploitation, « l'inventaire maximal en tritium de l'installation serait de 4 kg » [[IRSN, Rapport DSU n°217](#)], soit une activité de $1,4 \cdot 10^{18}$ Bq...

Un document de la CLI de Cadarache donne quelques détails sur les déchets tritiés : « la plupart de ces déchets ne pourront être acceptés par l'Andra qu'après décroissance du tritium afin de satisfaire les critères d'acceptation fixés par l'Andra ; la prise en charge de ces déchets doit donc se faire le cadre d'une filière incluant un entreposage de décroissance tritium (période radioactive de 12,3 ans) avant stockage définitif dans les centres Andra ».

ITER Organization (IO) « entreposera dans ses installations [en cellules chaudes] les déchets FMA tritiés purs dégazant (déchets faible et moyenne activité) et les MA-VL tritiés (déchets moyenne activité-vie longue), pour qu'ils puissent être traités ultérieurement avec les déchets de démantèlement ».

Pour les autres déchets « la France mettra à disposition d'IO une installation d'entreposage pour ses déchets TFA tritiés (déchets très faiblement actifs) et FMA tritiés irradiants VC (déchets faible et moyenne activité-vie courte) ». Le CEA « sera maître d'ouvrage pour la construction et exploitant nucléaire ». « Les déchets tritiés issus du démantèlement d'ITER seront également entreposés par le CEA. Ces déchets seront envoyés pour stockage définitif à l'Andra par le CEA bien au-delà de 2041 » [[CLI Cadarache, 2012](#)]. Sur quelle durée et à quel endroit ?

En fait on n'en sait rien. Prévu sur le site du CEA de Cadarache, cet entreposage intermédiaire baptisé « Intermed » devait être opérationnel en 2033. Mais, comme l'inventaire radiologique d'ITER est incomplet pour ne pas dire fantaisiste, difficile de dimensionner une installation d'entreposage. Explications plus nuancées avec un Avis de l'ASN de 2021 : « il existe néanmoins des incertitudes importantes concernant la nature et le volume des déchets tritiés issus de l'exploitation puis du démantèlement d'ITER ; que la taille et la durée de fonctionnement de l'installation Intermed dépendent notamment de l'inventaire en tritium de ces déchets, de la période de décroissance requise, des procédés de détritiation et de conditionnement préalables à leur entreposage dans Intermed et, plus globalement, des efforts d'ITER pour réduire la production et la nocivité des déchets tritiés.

(...)

Il est avéré que la conception et le calendrier d'Intermed dépendent fortement de la conception du bâtiment dit « des cellules chaudes » d'ITER et de la performance des procédés de détritiation qui seront mis en œuvre dans ITER ; que la conception des cellules chaudes d'ITER n'est pas achevée à ce jour ; que les interfaces entre les cellules chaudes et Intermed sont également encore à définir.

(...)

La conception d'Intermed n'a pas pu progresser ces dernières années et que la décision d'en engager la construction n'a pas été prise.

(...)

L'ASN constate que les objectifs du PNGMDR 2016-2018 concernant la définition d'une filière de gestion pour les déchets tritiés ne sont pas respectés. L'ASN souligne le besoin d'avancer activement dans la conception et la création de nouvelles capacités d'entreposage, afin qu'elles puissent être conçues et réalisées dans des conditions de sûreté et de radioprotection maîtrisées.

L'ASN recommande qu'ITER Organization mette à jour dans les meilleurs délais l'inventaire prévisionnel des déchets qui seront produits en exploitation, puis à l'occasion du démantèlement de l'installation ITER, et rende compte des efforts de réduction de la quantité et de la nocivité de ces déchets. Les volumes et la nature des déchets tritiés et les objectifs de performance des procédés de détritiation et de conditionnement dans

ITER devront notamment être détaillés. L'ASN recommande qu'ITER Organization, en lien étroit avec le CEA, définisse dans les meilleurs délais les modalités d'entreposage de ces futurs déchets tritiés et que les dossiers correspondant à la création de nouvelles installations ou à la modification d'installations existantes soient déposés auprès des autorités compétentes à une date fixée par le prochain PNGMDR, dans l'objectif que ces capacités d'entreposages soient disponibles dans des délais cohérents avec l'avancement du projet ITER [\[ASN, 11/05/2021\]](#).

Selon les données collectées dans le DAC d'ITER, les « Déchets d'exploitation courante » représentent un flux annuel de 286 m³, des déchets classés principalement dans la catégorie FMA-VC (pour 80 m³ de TFA), soit un total de 5720 m³ sur la vingtaine d'années d'exploitation prévue [\[DAC ITER, 2011 - Cf. Pièce 6 page 135\]](#).

Pour estimer la masse de ces déchets à partir de leur volume, aidons-nous des renseignements trouvés dans Wikipédia sur les déchets d'EDF. Pour « une production annuelle d'électricité de 410 TWh » (avec Fessenheim), et « 1 200 tonnes de métal lourd consommé, déchargé, retraité » et « une irradiation moyenne du combustible proche de 45 000 MWj/tMLi », la production annuelle par EDF de déchets de type A (TFA et FMA-VC) est de « 56 400 t » pour un volume de « 15 000 m³ » [\[Wikipédia\]](#). On peut en déduire la densité moyenne des déchets, soit 3,76 t/m³.

Sur ce postulat, plus de 1000 t de déchets FMA-VC et TFA seront donc produits annuellement par ITER. C'est dans l'ordre de grandeur de la quantité moyenne de ce type de déchets générés tous les ans par une tranche REP D'EDF (972 t).

Lors des « maintenances lourdes », des « déchets de maintenance [seront] générés par le remplacement des composants » avec « environ 1 200 tonnes générées au cours de 20 ans d'exploitation d'ITER. Ces déchets sont considérés comme principalement MA-VL, hormis 60 tonnes de déchets exclusivement tritiés » [\[DAC ITER, 2011 - Cf. Pièce 6 page 135\]](#). En moyenne sur la période d'exploitation, cela représente 60 t de MA-VL par an.

Toujours d'après [Wikipédia](#), pour le parc de centrales EDF, la quantité annuelle de déchets MA-VL produite a été de 431 t (pour 58 réacteurs) soit en moyenne 7,4 t par tranche.

Certes, ITER ne produira pas de déchets HA-VL comme les "cendres" de combustible des tranches REP (en moyenne 6,2 t/an/réacteur) mais beaucoup plus de déchets MA-VL qu'un REP. Qu'ils soient HA-VL ou MA-VL, ces déchets n'ont pour l'instant aucun exutoire. Il est prévu de les dissimuler dans le stockage géologique profond en projet de Cigéo très controversé, avec, pour les MA-VL d'ITER, un entreposage intermédiaire pour la décroissance du tritium d'au moins 50 ans avant leur possible prise en charge par l'Andra.

A partir de la « Phase de cessation définitive d'exploitation » (CDE) d'ITER, toujours selon les chiffres du DAC, 2 496 t de déchets MA-VL seront produits avec le démontage du divertor et des systèmes de couverture et de chauffage.

Pendant le démantèlement de l'installation, le démontage des autres composants va générer 27 626 t de déchets FMA ou TFA. Pour le démontage des bâtiments ce sera 6 650 t de déchets estampillés TFA ou FMA-VC et 15 500 t de Déchets industriels banaux (DIB) [\[DAC ITER, 2011 - Pièce 10 Cf. page 11\]](#). En comparaison, la masse de déchets estimés pour démanteler une tranche de Fessenheim paraît modeste. Nous avons synthétisé dans le tableau ci-dessous la quantité de déchets produite par un REP ainsi que celle estimée d'ITER tant en exploitation qu'en démantèlement.

Comparaison des déchets radioactifs produits en exploitation et en démantèlement entre ITER et un REP			
Déchets	Type	ITER ¹	REP
		Masse annuelle (t)	
Exploitation	TFA	300	972 ²
	FMA-VC	748	
	MA-VL	60	7,4 ²
	HA-VL	0	6,2 ²
		Masse totale (t)	
CDE et Démantèlement	TFA	34 276	6 300 ³
	FMA-VC		3 100 ³
	MA-VL	2 496	100 ³
	HA-VL	0	0
Pour ITER, ce tableau est construit d'après les estimations d'ITER Organization. Pour les REP en exploitation, les données proviennent de Wikipédia et correspondent à la production annuelle moyenne de déchets pour 410 TWh d'électricité produite par an avec les 58 réacteurs du parc EDF (moyenne de production de 2002 à 2018). Celles du démantèlement REP sont issues d'EDF et correspondent à une tranche de Fessenheim.			
Sources 1 - DAC ITER, 2011 - Pièce 10 - Démantèlement 2 - Déchets radioactifs générés par la production d'électricité d'origine nucléaire en France -Wikipédia 3 - Plan de démantèlement INB 75 - EDF, 2020			

Rejets radioactifs

Comme toutes installations nucléaires, ITER va générer des effluents radioactifs liquides et surtout gazeux. Bien supérieurs à ceux d'une tranche REP, les rejets de tritium gazeux (sous forme d'eau tritiée) seront très importants lorsque l'installation en sera aux opérations de plasma deutérium/tritium et surtout lors des maintenances lourdes. Le tableau page suivante synthétise le terme source associé aux rejets annuels moyens d'une tranche REP d'EDF comparé au terme source estimé des rejets annuels d'ITER. A noter que l'estimation des rejets d'ITER est faite à partir d'un terme source incomplet.

Lors des Journées technique de la Société française de radioprotection (SFRP) des 5 et 6 novembre 2015, les « Rejets liquides et gazeux de l'installation expérimentale ITER en fonctionnement de routine » ont été présentés. En sus du tritium, ITER va créer (et rejeter) des gaz rares comme l'argon 41 provenant de « l'activation de l'argon introduit dans la chambre à vide et celui contenu dans l'air proche des flux neutroniques ».

Radioprotection

**Comparaison des rejets radioactifs annuels
entre ITER et une centrale REP française
durant leur exploitation**

Effluents		³ H (TBq)	Gaz rares (TBq)	¹⁴ C (GBq)	Autres bêta- gamma (GBq)
ITER	Liquides	0,2	/	0,2	0,2
	Gazeux	220 à 900	5	5,4	2
REP	Liquides	10 à 35	/	8 à 20	0,5
	Gazeux	0,35 à 0,65	0,3 à 1*	120 à 270	0,004
Pour ITER, la fourchette de valeur représente les rejets annuels avec et sans phase de maintenance lourde. Exemple avec le tritium gazeux : 220 TBq pour les années d'exploitation et 900 TBq pour les années avec maintenance lourde. Pour les REP, la fourchette de valeur représente une moyenne annuelle par tranche en fonction des paliers de puissance. Exemple avec le tritium gazeux : de 0,35 à 0,65 GBq par tranche. * En cas de ruptures de gaines, les rejets de gaz rares peuvent dépasser 2 TBq/an/tranches concernées. Sources, Demande d'autorisation de création - Pièce 6 : Étude d'impact - Iter Organization, 2011 Centrales nucléaires et environnement, EDF 2020					

On trouvera dans les rejets d'ITER du carbone 14 créé par « activation de l'azote contenu, soit dans le fluide de refroidissement, soit dans les additifs introduits pour limiter la corrosion » mais « également via des traces d'azote éventuellement présentes proches des flux neutroniques ». Sous la rubrique Autres bêta/gamma (Cf. tableau) et pour ITER, on trouve :

- les produits de corrosion activés qui ont pour origine « l'activation des structures métalliques des circuits de refroidissement sous flux neutroniques et corrosion de ces structures » ; on trouve ces « produits de corrosion activés dans les circuits de refroidissement ».
- les poussières de béryllium et de tungstène activées qui proviennent de « l'activation des structures sous flux neutroniques, puis "érosion" des composants face au plasma » [[SFRP, 2015](#)].

Malgré les centaines de TBq rejetés annuellement, **ITER sera étanche**, selon ITER Organization : « Pour éviter tout risque de relâchement de tritium, plusieurs barrières se dressent entre l'installation et l'environnement.

Les parois de la chambre à vide constituent la première de ces barrières de sûreté. La deuxième est formée par les bâtiments et les systèmes de détritiation chargés d'extraire le tritium des gaz et des liquides. Dans les zones où le tritium fait l'objet de manutention, l'organisation des locaux en cascades de pressions atmosphériques négatives empêchera toute diffusion du tritium de l'intérieur vers l'extérieur » [ITER et la Sûreté, [iter.org](#)]. La fable des barrières qui seraient étanches, un incontournable de l'industrie nucléaire...

Rappelons les propos de l'ASN que nous avons cités plus haut (Cf. page 11) : « **les éléments transmis concernant les cartographies radiologiques ne permettent pas de démontrer la maîtrise de la limitation de l'exposition aux rayonnements ionisants, enjeu majeur pour une installation de fusion nucléaire. En particulier, l'activation progressive des matériaux sous l'effet du flux neutronique intense n'est pas correctement prise en compte et l'exposition des travailleurs dans les locaux attenants aux bâtiments nucléaires doit être évaluée avec des hypothèses réalistes prudentes** » [[ASN, 25 janvier 2022](#)].

L'Association pour les techniques et les sciences de radioprotection présente les « enjeux de radioprotection spécifiques » d'ITER : « mode de fonctionnement en régime pulsé, lors de ces plasmas, émission d'une source intense de neutrons de 14 MeV et de Gammas de 6 MeV, quantité de tritium importante, et activation des structures conduisant à des débits de dose relativement importants lors des phases de maintenance nécessitant la mise en œuvre d'une démarche ALARA formalisée.

Les enjeux de radioprotection vont progressivement monter avec la radiologie industrielle en phase de chantier, puis des premiers plasmas avec l'émission de neutrons et de gammas induits avec des puissances faibles (~2029) jusqu'à la phase Deutérium-Tritium (>2035) » [[ATSR, 2021](#)].

Dans une cartographie du flux simulé de neutrons à l'intérieur du Tokamak diffusée dans le CLIC Info d'octobre 2021, la revue de la CLI de Cadarache, on note un « flux [maximal] de neutrons estimés sur un plasma de 500 MW » de « 10^{12} n/cm²/s » [[CLIC Info n° 72](#), Octobre 2021].

« La radioprotection dans ITER » a été abordé dans le n° 42 (2007) de la revue Radioprotection. Les débits de dose absorbée sont indiqués pour différentes parties de l'installation : « Pendant le fonctionnement du réacteur de fusion, les débits de dose à l'intérieur l'enceinte à vide sont d'environ 10^8 à 10^9 Gy/h, et d'environ 10 Gy/h à l'intérieur du cryostat, derrière la paroi externe de l'enceinte à vide ». A l'arrêt du plasma, le flux de neutrons s'interrompt mais le rayonnement gamma des matériaux activés est impressionnant : « 10^6 secondes (12 jours) après l'arrêt, les débits de dose diminuent à 630 Gy/h à l'intérieur de l'enceinte à vide. Les débits de dose au contact de composant face au plasma, couvertures et divertor est de l'ordre de 10^3 Gy/h 30 jours après l'arrêt et de quelques centaines de Gy/h un an après l'arrêt » [[EDP Science, 2007](#)]. Comme on dit dans le jargon, ça va cracher... La radioprotection du personnel va effectivement être compliquée comme le sera la gestion des déchets de béryllium (couverture) et de tungstène (divertor) lors des maintenances lourdes.

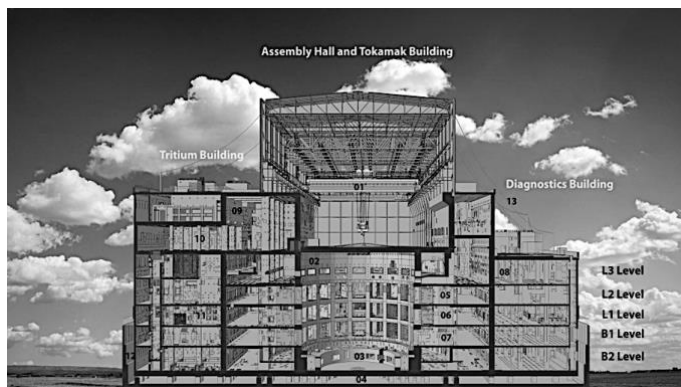
Le tritium

La contamination en tritium de l'installation va être très importante compte-tenu des quantités utilisées. De l'ordre d'une centaine de grammes par an lors des premières années d'exploitation (essai et mise en service des systèmes de détritiation à « 1100 g par an pour une période d'exploitation de 12 ans » à partir de la phase deutérium-tritium (D-T) [[Pearson et al, 2018](#)].

Selon ITER Organization, « Le tritium est un élément qui, bien que faiblement radioactif, doit être confiné de manière extrêmement rigoureuse — c'est là l'un des objectifs de sûreté majeurs de l'installation ITER » [ITER et la Sûreté, [iter.org](https://www.iter.org)].

ITER va être pourvu d'un imposant système de détritiation afin de limiter la quantité de tritium qui va contaminer l'ensemble de l'installation et surtout de réutiliser une partie du tritium perdu. Car le rendement de fusion n'est pas terrible : selon l'IRSN, « Pour l'installation ITER, le taux de combustion dans le plasma ne devrait pas dépasser 0,3 %. Chaque décharge plasma de quelques minutes mettra en œuvre environ 100 g de tritium dont 0,3 g environ seront consommés ; quelques grammes resteront adsorbés dans les premières parois des équipements internes de la chambre à vide, le reste devra être recyclé dans le circuit combustible » [IRSN, 2017 - cf. page 44].

Selon la CLI de Cadarache, une usine à gaz va donc être nécessaire afin de récupérer une partie des 99,7% du tritium migrateur : c'est le bâtiment tritium dénommé « Tritium building », un grand système industriel accolé au bâtiment du tokamak comme on peut le voir dans la figure ci-dessous.



Design intérieur du complexe tokamak

Source, [iter.org](https://www.iter.org)

La « présentation CLI » (2017) fait le « point sur le système de détritiation ». A cette date, le « système » était en phase d'« avant-projet détaillé », une phase s'étalant de 2014 à 2022. Ensuite, il faudra passer à la fabrication puis à l'installation, le planning de réalisation mentionnant une mise en service en 2030 et un premier plasma D-T pour 2035 [CLI Cadarache, 13/09/17].

Dans cette usine, il y aura un « système de traitement des gaz actifs (...). Il s'agit d'un système conventionnel de suppression de tritium avec deux sections distinctes : les recombineurs et les sécheurs. La détritiation est réalisée par vaporisation de l'eau d'abord qui est ensuite piégée dans des tamis moléculaires secs qui filtrent l'eau selon que la molécule soit de l'hydrogène, du deutérium ou du tritium et permet de récupérer chaque gaz séparément. Au cours des dernières années, ce système a été utilisé de façon intensive dans l'installation JET [Joint European Torus], démontrant la faisabilité d'atteindre des facteurs de détritiation d'environ 100 » [DAC ITER, 2011 - Cf. Pièce 6 (page 269)].

Un système utilisé de façon intensive mais sur de faibles quantités. D'après l'IRSN, « le Joint European Torus (JET),

de puissance égale à 16 MWth, a utilisé au total 20 g de tritium » [IRSN, Rapport DSU n°217].

Changement d'échelle avec ITER. Un article paru dans la revue de l'AIEA Nuclear fusion donne l'ordre de grandeur de la masse de tritium à gérer : « Dans l'usine de tritium d'ITER, un stock total d'environ 2 à 3 kg sera nécessaire pour faire fonctionner la machine en phase de DT » [L.R. Cristescu et al 2007 Nuclear Fusion n°47]. Avec de telles masses, le terme source tritium de l'usine sera de 0,7 à 1.10^{18} Bq.

Pour son fonctionnement, ITER, « dépendra entièrement d'un approvisionnement externe en tritium d'environ 18 kg pendant toute la durée de son exploitation ». (...) « Le tritium est généré dans les réacteurs de fission de type CANDU par l'interaction des neutrons de fission avec l'eau lourde du modérateur/caloporteur, produisant environ 130 g de tritium par an pour un réacteur de type CANDU. Le tritium ne peut être extrait du modérateur à eau lourde qu'au moyen d'une installation d'extraction du tritium (IET), dont deux seulement sont actuellement en service, l'une au Canada et l'autre en Corée du Sud, bien qu'il soit prévu d'en construire une troisième en Roumanie.

L'approvisionnement futur en tritium des réacteurs CANDU est très incertain, car on ne sait pas quelle proportion du parc actuel de réacteurs vieillissants sera prolongée, si les installations d'extraction de tritium en service continueront à détritier ou si de nouvelles installations d'extraction de tritium seront mises en service » [Pearson et al, 2018]. Le CANDU est un réacteur de conception canadienne à eau lourde pressurisée et utilisant de l'uranium naturel. L'eau lourde (D_2O) sert de modérateur et de caloporteur.

Lors de chaque décharge plasma, « quelques grammes resteront adsorbés dans les premières parois » avec une migration de tritium vers les « deux systèmes de refroidissement primaires de la couverture interne et du diverteur (...) d'environ 0,7 g par système » [IRSN, 2017], soit 1,4 g de tritium à traiter par le système de traitement du fluide de refroidissement (Cf. paragraphe suivant). A raison d'environ 0,3 g consommé par décharge, le système de traitement des gaz actifs aura donc sur les bras 98,3 g (soit $3,5 \cdot 10^{16}$ Bq...). Avec un facteur de détritiation d'environ 100, 97,3 g sont susceptibles d'être récupérés et stockés pour le prochain plasma et près de 1 g (350 TBq) iront grossir la quantité d'effluents liquides à traiter.

Pour les effluents liquides avec une masse de tritium estimée à 2,4 g ($0,7 \times 2 + 1$) par plasma, soit une activité d'environ 860 TBq, « Le procédé CECE (Combined Electrolysis Catalytic Exchange) combinant l'électrolyse avec le procédé LPCE (Liquid Phase Catalytic Exchange) est considéré comme le plus efficace et constitue aujourd'hui la référence pour le traitement des effluents liquides tritiés de l'installation ITER. Il a également été mis en œuvre à l'échelle pilote, au Japon, sur le site du réacteur Fugen (capacité de traitement de $3,6 \text{ L.j}^{-1}$, facteur de concentration de l'eau tritiée proche de 10 000), ainsi que dans l'installation pilote de production d'eau lourde CIRCE à Hamilton au Canada (capacité de traitement de $1,5 \text{ L.h}^{-1}$, facteur de décontamination en tritium de l'ordre de 30 000). Plus récemment, des facteurs de séparation encore plus élevés, atteignant des valeurs de 50 000, ont été obtenus lors d'essais de décontamination d'eau lourde

dans les laboratoires de Chalk River ». Quelques bémols cependant, « Le procédé CECE a été mis en œuvre uniquement dans des unités pilote » et « les principaux inconvénients de ce procédé résident (...) dans les coûts de fonctionnement liés principalement à la consommation énergétique (...), les risques liés à la présence d'effluents fortement concentrés en tritium nécessitant de disposer de systèmes de confinement éprouvés ainsi que les risques d'explosion liés à la présence de dihydrogène gazeux » [[Livre blanc du tritium, ASN 2023](#) (Mise à jour)].

Mais le tritium est capricieux, il a la fâcheuse habitude de diffuser au travers des conditionnements. La lettre d'information n° 5 (janvier 2008) de la cellule Carmin du CEA résume parfaitement la problématique tritium : « Il diffuse dans les matériaux habituellement utilisés pour confiner, et à l'inverse, on ne parvient à s'en débarrasser qu'au prix d'efforts démesurés. Les modèles de transfert oscillent entre une simplicité déconcertante en moyenne (rejet continu) et une forte complexité instantanée (rejet ponctuel) » [Carminfo n° 5 - Archive GSIEN].

La perméation du tritium à travers les équipements dans les locaux va générer des émissions chroniques de tritium. La contamination atmosphérique des locaux devrait être importante même avec un confinement éprouvé et causer quelques soucis de radioprotection.

Pour le traitement de l'air respirable des locaux, « des actions de Recherche et de Développement ont conduit à la validation des systèmes de détritiation de l'atmosphère ; elles comprennent un essai sur des colonnes d'épuration utilisées. Le système fournit de très bonnes performances. D'autres solutions technologiques sont également envisagées afin d'optimiser le procédé pour atteindre de meilleures efficacités et une fiabilité accrue » [[DAC ITER, 2011](#) - Cf. Pièce 6 (page 269)]. Malgré de très bonnes performances, on comprend que des progrès restent à faire dans l'efficacité de la détritiation de l'air respirable.

Le tritium est un émetteur bêta pur de faible énergie dont la dangerosité est sous-évaluée. Laissons la parole à Monique : « L'eau dont un atome d'hydrogène a été remplacé par un atome de tritium est vite éliminée par le corps humain. En revanche, lorsque le tritium se lie à une molécule organique, elle peut se fixer partout, avec une affinité pour les cellules en développement. C'est pourquoi les études de toxicité se focalisent sur la femme enceinte et le fœtus » [[Science actualités, 02/12/08](#)].

Raymond Sené nous en dit plus (Cf. page 23).

Par ailleurs, des lanceurs d'alerte ont informé la Commission européenne sur des problèmes de sûreté, de radioprotection et de santé du personnel d'ITER : Reporterre nous les détaille (Cf. page 30).

Laissons le mot de la fin à l'ASN : « Les quantités importantes de tritium qui seront mises en jeu dans cette installation, le flux neutronique intense, ainsi que l'activation des matériaux qui en résulte constituent des enjeux particuliers du point de vue de la radioprotection et représenteront de véritables défis pour la gestion sûre des déchets pendant l'exploitation et lors du démantèlement de l'installation » [[ASN, 7/07/22](#)].



Raymond et Monique Sené en compagnie de Jean-Claude Autret dans le jardin d'Orsay

Les coûts et les délais

« Le coût de la construction d'ITER était estimé à 4,6 milliards d'euros en 2006 lors du débat public. C'était 16 milliards d'euros en 2012, 20 milliards d'euros en 2018, soit plus de 300% de surcoût à mi-construction » [[Mediapart, 24/11/22](#)].

Reporterre évoque même une ardoise de « 40 milliards d'euros » [[Reporterre, 2/03/22](#)].

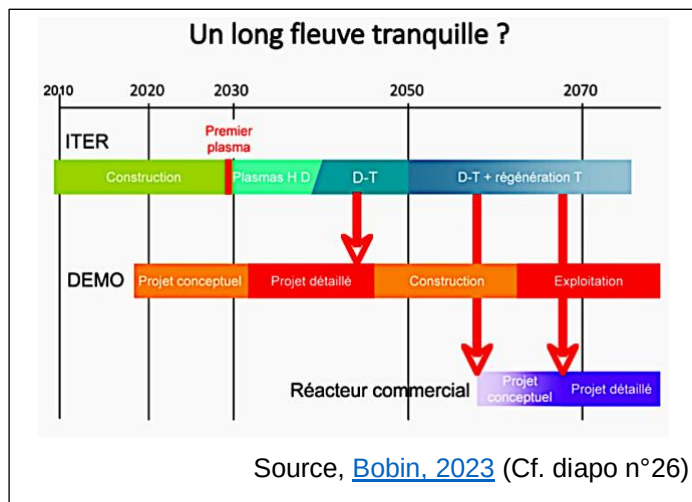
Au début du chantier de l'installation ITER (2008), le premier plasma était envisagé pour 2018. Comme tous projets pharaoniques, des écarts apparaissent inévitablement pendant leur construction, conduisant à l'allongement considérable des coûts et des délais de réalisation.

En août 2016, ITER Organization annonçait un « Objectif 2025 » pour le premier plasma et le début de la phase D-T « à l'horizon 2035 » [[Iter Mag n°9](#)].

Avec la crise du Covid et la guerre en Ukraine, le planning d'ITER a déjà glissé de 35 mois. Les derniers avatars (fissures sur les tubulures de refroidissement de l'écran thermique et déformations de secteurs de la chambre à vide) vont se traduire par un nouveau dérapage du planning. Même si le bricolage des éléments défectueux est couronné de succès et qu'il n'y a plus *aucun* autre aléa technique, le début de la phase D-T en 2040 tiendrait du prodige.

Le 14 février 2023, le physicien Jean-Louis Bobin, spécialiste des plasmas, a donné une conférence sur la « Fusion nucléaire : déconvenues et succès ». Dans une de ses diapos, il présente le nouveau planning d'ITER avec un début de phase D-T estimé à 2040 (Cf. page suivante) avec ce commentaire : « les dates clé sont repoussées de plusieurs années dans l'avenir (sans garantie quant aux dates) » [[Bobin, 14/02/23](#)].

Deux semaines plus tard, en date du « 28 février 2023 », ITER Organization communique : le premier plasma est toujours annoncé à « Dec 2025 » sur le site Internet d'ITER Organization avec, tout de même, une précision baroque : « calendrier établi en 2016, en cours d'actualisation » [Construire ITER, [iter.org](https://www.iter.org)]. Ce sont les aléas de la communication...



La fusion a-t-elle un avenir avec le réacteur DEMO ?

En novembre 2018, Fusion engineering and design publie un article : « *Approvisionnement et utilisation du tritium : une question clé pour le développement de l'énergie de fusion nucléaire* ».

« L'exploitation à pleine puissance du réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER) a été retardée et commencera désormais en 2035. Les retards dans le calendrier de l'ITER peuvent affecter la disponibilité du tritium pour les dispositifs de fusion ultérieurs, étant donné que le parc mondial de réacteurs de fission de type CANDU commence à s'éteindre progressivement au cours des prochaines décennies. La présente étude fournit un compte rendu actualisé de la disponibilité future du tritium en intégrant les incertitudes récentes concernant la prolongation de la durée de vie du parc mondial de réacteurs CANDU et en tenant compte de l'impact potentiel de la demande de tritium dans le cadre d'autres projets de fusion. Malgré les retards, nos projections suggèrent que le tritium CANDU reste suffisant pour permettre l'exploitation complète d'ITER. Cependant, la disponibilité du tritium pour un réacteur DEMO après ITER est très incertaine et dépend de nombreuses externalités incontrôlables ».

(...)

« Les conséquences d'un nouveau retard de 5 ans sur le calendrier d'ITER (D-T à partir de 2040) n'affecterait probablement pas la mission ITER elle-même, mais cela pourrait signifier qu'il ne resterait plus que 7,6 kg de tritium disponibles pour DEMO en 2057. Par conséquent, tout nouveau dérapage d'ITER est inacceptable du point de vue de l'approvisionnement en tritium, si l'on veut réaliser la voie ITER-DEMO vers l'énergie de fusion, car la plus grande quantité possible de tritium doit être mise à disposition pour assurer le démarrage de DEMO » [[Pearson et al, 2018](#)].

Le physicien Jean-Louis Bobin donne son avis pour l'après ITER : « l'étape suivante serait sous le nom de DEMO un véritable réacteur produisant de l'électricité, amorce d'une commercialisation en cas de succès. Des études papier sont déjà en cours dans divers laboratoires. Elles ne partent

pas de zéro (première version ITER-1998). Aucune décision n'est encore prise pour la suite et n'est semble-t-il pas près de l'être » [[Bobin, 14/02/23](#)].

Verrou technologique ?

« Le tritium provenant de la détritiation de l'eau lourde des réacteurs nucléaires actuels de type CANDU qui sera utilisé pour l'installation ITER ne sera pas disponible en quantités suffisantes pour pouvoir alimenter les réacteurs DEMO pour lesquels les besoins de tritium seront beaucoup plus importants.

(...)

Pour assurer l'alimentation des réacteurs DEMO en tritium, les couvertures tritigènes de ces réacteurs visent dès lors à produire plus de tritium que le réacteur n'en consommera, afin de tenir compte des pertes de tritium dues à sa décroissance radioactive et des pertes de tritium dues à sa perméation dans les équipements de l'installation.

(...)

Les nombreuses publications portant sur la capacité d'une installation nucléaire de fusion à s'autoalimenter en tritium montrent que cet objectif, qui est une condition sine qua non de l'exploitation industrielle des réacteurs à fusion de type tokamak pour la production d'électricité, est difficile à obtenir » [[IRSN, 2017](#)].

Le concept de couvertures tritigènes sera testé sur ITER dans les dernières années de son exploitation. Il s'agit de modules expérimentaux contenant du lithium qui réagit aux neutrons en produisant du tritium : « le neutron incident est absorbé par l'atome de lithium, lequel se recombine alors en un atome de tritium et un atome d'hélium. On peut ensuite extraire le tritium de la couverture, le recycler dans le plasma et le rendre à sa fonction de combustible. (...) On appelle "couvertures tritigènes" les couvertures qui contiennent du lithium. La réaction de fusion permet ainsi de produire du tritium de manière continue. Une fois la réaction de fusion amorcée dans un tokamak, il suffira pour l'entretenir de l'alimenter en deutérium et en lithium, deux éléments disponibles en abondance » [[iter.org](https://www.iter.org)]. Dans la pratique, pour fabriquer du tritium il faut des neutrons et pour avoir des neutrons il faut avoir démarré la réaction de fusion à l'aide d'un stock conséquent de tritium...

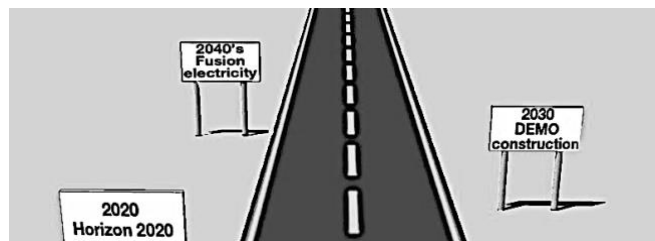
Il faudra donc une grande quantité de tritium pour démarrer le réacteur de démonstration DEMO : « Il est difficile d'estimer les quantités de tritium nécessaires au démarrage, car les valeurs dépendent fortement des progrès de la technologie ». Même avec des progrès technologiques très importants « le tritium nécessaire au démarrage à pleine puissance devrait encore être d'environ 8 kg. En revanche, si les progrès technologiques sont limités, le tritium nécessaire au démarrage d'un DEMO peut atteindre 50 kg » [[Pearson et al, 2018](#)].

Ce ne serait qu'après avoir validé l'exploitation d'ITER en phase D-T que le projet détaillé de DEMO pourrait être finalisé. Avec une prévision de phase D-T pour 2040, l'exploitation de DEMO ne démarrerait qu'après 2060 (Cf. planning Bobin ci-dessus). Combien restera-t-il de réacteurs CANDU en fonctionnement à cette date ? Encore faudrait-il être capable de construire DEMO en moins de 10 ans...

L'optimisme des zéloteurs de la fusion est saisissant. Avec pour titre « L'électricité issue de la fusion sur le réseau », un

article de « *ITER Newsline 255* » (04/02/13) publiait le dessin ci-contre.

Conclusion avec la SFEN qui ne semble pas bien optimiste quant à la réussite de l'aventure : « *Pour la fusion, on n'a aujourd'hui rien inventé de plus simple que de porter les noyaux légers à des températures dépassant cent millions de degrés pour qu'ils entrent en contact et que la « colle » nucléaire les unisse. Toutes les difficultés technologiques qui devront être surmontées pour une exploitation industrielle de la fusion proviennent de cette gigantesque température* » [[SFEN, 12/01/22](#)].



Source, iter.org/newsline/255

TRITIUM

Bonjour, les amis vétérans
Raymond SENÉ, mars 2023



Préambule :

Pourquoi ce sous-titre ?

A l'époque glorieuse, héroïque de la guerre d'Algérie (non ! de l'opération de maintien de l'ordre ?), j'eus le plaisir d'appartenir à la classe 60 2B. Incorporé dans la colo (artillerie de marine), pendant une année j'ai été formé et entraîné à la tâche « vivifiante » de la routine civilisatrice des commandos dans les Aurès. Parmi les joyeusetés, il y avait dans le camp de Mourmelon, la reproduction d'une mecha, et un des exercices consistait à la « prise » de cet objectif.

Puis, au moment où je préparais mon sac pour aller embarquer à Marseille pour aller passer quelque temps dans ce pays ensoleillé, je fus convoqué par la sûreté militaire. Après m'avoir fait décliner mon curriculum vitae, puis posé quelques questions fondamentales, du genre « êtes-vous syndiqué ? » (Ma réponse : la FEN – Fédération de l'Éducation Nationale - ce qui lui déclencha un immense sourire, me montrant à quel point ce syndicat était considéré comme dangereux), il m'annonça que j'étais muté à la STA (Section Technique des Armées), avec départ sur le champ pour le camp de Satory (Versailles). Au bout de quelques jours, je fus expédié au fort d'Aubervilliers, où officiait le CERAM (Centre d'Expérimentation et Recherche Atomique Militaire), et affecté à la STA Y 33. (STA Y pour arme atomique et STA Z pour arme chimique). J'y rencontrais quelques physiciens nucléaires (dont plusieurs de l'IPN d'Orsay, également du centre de Strasbourg avec qui j'avais eu des rapports scientifiques avant mon incorporation) et à ma grande surprise, un « carrière », avec plein de barrettes ... qui me reconnut.

En propédeutique MPC (Math-Physique-Chimie) à la faculté des sciences de Paris, il était le binôme de travaux pratiques de chimie de ma future épouse ... Pour des officiers d'active, MPC servait d'examen d'entrée pour leur formation technique au CERAM. Il y en avait de très bons, et d'autres... du genre de ce capitaine au fort accent morvandiaux qui nous avait déclaré « les Viets n'ont pas eu ma peau, les Röntgens ne m'auront pas ! ».

Après quelques mois au fort d'Aubervilliers à bricoler un compteur « 4π beta », nos occupations se centrèrent sur les premiers tirs sur le site de Reggane. A partir des prélèvements atmosphériques effectués au moment du tir,

les collègues calculèrent une estimation de la puissance de cette bombe. La valeur trouvée fit le bonheur du commandant qui dirigeait notre groupe. Il a pu communiquer à ses homologues, une donnée que les gens du CEA-DAM avait refusé de leur transmettre.

Tirs atmosphériques de Reggane : Gerboise bleue, puis blanche, puis rouge et enfin verte.

On arrive en 1961, c'est la fin de la guerre d'Algérie, les pourparlers d'Évian, les sautes d'humeur d'officiers à Alger, l'OAS., et la 4ème bombe est déjà arrivée à Alger. Vite il faut la transporter à Reggane ... la petite histoire raconte que le transport se fit avec une 2 chevaux. Il semblerait que ce n'est que la charge de Plutonium qui fut véhiculée. Et ce fut Gerboise verte, le 25 avril 1961 (question « bête », la couleur fut-elle choisie pour faire un clin d'œil au FLN ?)

Les accords d'Évian (indépendance le 1er mai 1962), comportent une annexe restée secrète fort longtemps. La France pouvait continuer à faire ses essais nucléaires pendant 5 ans... renouvelables. Donc, le 7 novembre 1961 eut lieu le premier tir souterrain dans le Tan Affela (Hoggar). Le second baptisé BERYL eut lieu le 1er mai. Non confiné ... (Voir [Gazette Nucléaire 298/299](#), janvier 2023). La STA Y 33 est immédiatement mise en œuvre. On emballe le matériel (dont mon analyseur multicanaux ... le tout premier transistorisé d'origine US) et tout ce qui nous semble devoir ou pouvoir être utile. Arrivée sur place le 9 mai. Ouf, nous avons échappé au nuage originel. Mais nous allons avoir droit à tout ce qui s'étant déposé, va être promené par les vents fréquents.

... Et je suis resté 9 mois dans cette « vivifiante » ambiance, à travailler sur les divers filtres de pompage d'air provenant de la zone, filtres que nous allions relever sur les "Babars", sur les prélèvements que nous allions effectuer à Tamanrasset, à Djanet. La garnison française qui était en poste à Djanet était ravie de nous voir. Leur courrier, que nous leur apportions, arrivait une semaine plus tôt que par la voie normale. Par contre ils n'ont jamais connu les résultats de nos mesures, donc quel était leur niveau de contamination.

De notre côté, toutes ces occupations étaient faites en tenue saharienne, sans aucune tenue de protection, sans

films dosimètres (NON, il y en avait un, accroché en tant que témoin sur un mur dans le couloir de notre baraque au camp St- Laurent). Je n'ai pas souvenir d'avoir vu un quelconque relevé de ce dosimètre.

Quant aux bonhommes... si au fort d'Aubervilliers nous avions un suivi hématologique régulier, à In Ecker.... rien. Et lors de ma visite médicale de démobilisation effectuée à Reggane (je dépendais alors du 620^{ème} GAS : Groupe d'Armes Spéciales), j'eus droit de la part du toubib, en réponse à ma question, « *je n'ai pas le matériel. Mais si vous y tenez, je peux le faire venir d'Alger. Cela va prendre une bonne semaine* ». Je venais de faire 24 mois d'armée, plus une grosse quarantaine de jours de permission libérable – non pris en raison de mon affectation saharienne... Donc je suis rentré... sans n'avoir subi le moindre contrôle hématologique ou autre.

Avant de commencer sur le tritium, je tiens à vous prévenir... 40 ans de physique nucléaire, cela laisse des traces....

Parlons du TRITIUM

Au premier abord, ce n'est que de l'Hydrogène et l'hydrogène est un des éléments le plus présent dans notre vie : l'eau : H₂O, l'alcool (éthylrique) ; C₂H₅OH (à boire avec modération !).

Parlons de la fratrie hydrogénique :

- H >>> 1 proton, masse 1, nom de famille : Hydrogène - atome stable (les physiciens, toujours aussi fouineurs, ont lancé des recherches pour essayer de mesurer le temps de vie du proton. Les plus optimistes pensent observer une désintégration tous les ... quelques millions d'années.). L'hydrogène c'est aussi le plus simple des atomes, car il n'a dans son noyau qu'une seule particule, un *proton* et un seul *électron* qui tourne autour, à très grande distance relative.

- D >>> 1 proton + 1 neutron, masse 2, nom de famille : Deutérium : atome stable (²H), ou hydrogène **lourd**. Il n'est présent qu'à raison de 0,015 % dans l'hydrogène de l'air.

- T >>> 1 proton + 2 neutrons, masse 3, nom de famille : Tritium : atome radioactif (³H)

Le deutérium et le tritium sont appelés des *isotopes* de l'hydrogène. Ils ont les mêmes caractéristiques chimiques que l'hydrogène.

Le Tritium, son devenir :

³H > ³He + e⁻ (électron baptisé bêta moins) + neutrino

³H (1 proton + 2 neutrons) >> ³He (2 protons + 1 neutron) isotope de l'Hélium de masse 3, non radioactif.

> L'électron (rayonnement bêta moins) a une énergie maximale de 18,6 keV, et une énergie moyenne de 5,68 keV. Son parcours moyen dans l'eau ou les tissus organiques est de l'ordre du micron (millième de millimètre), d'où une interaction de proximité sur la molécule où l'atome de tritium était fixé.

La période (c'est à dire le temps au bout duquel, la moitié du produit d'origine a effectué sa désintégration) est de 12,26 ans. A noter, pour corriger de trop nombreuses interprétations erronées, qu'au bout de 10 périodes la quantité initiale a été réduite par un facteur 2 puissance 10, c'est-à-dire 1024. Donc, contrairement à ce qu'on peut souvent entendre, le produit n'a pas disparu. Il s'agit de

savoir si un millième de la quantité initiale c'est encore « beaucoup » !!!!

Notons également que le tritium inhalé ou ingéré par l'homme se comporte comme l'eau que nous incorporons. Cela signifie qu'un adulte, par élimination naturelle, réduit de moitié tous les 10 jours la quantité incorporée. Cela s'appelle la période *biologique* du tritium.

> le neutrino ... boff ... particule de masse quasi nulle, il a une probabilité d'interaction tellement faible qu'il peut traverser la planète et ressortir de l'autre côté sans rien faire. Pour essayer d'en détecter, les physiciens ont développé des détecteurs volumineux ultra sophistiqués, dont une installation comportant une flopée de photomultiplicateurs plongés dans la mer, sensés détecter les quelques photons d'effet Cerenkov [ou Tcherenkov] produits par un neutrino en provenance du soleil.

Sous quelle forme le rencontre-t-on ?

- L'Eau tritiée (HTO), est une molécule d'eau où un atome de tritium a remplacé un atome d'hydrogène (standard).

- Le Tritium gazeux (HT), est une molécule d'hydrogène gazeux (H₂ ou HH) où un atome de tritium (T) a remplacé un atome d'hydrogène (d'où HT).

- Le Tritium, peut aussi se lier à la matière organique (désigné en anglais OBT : Organically Bound Tritium). Sous cette forme on en retrouve dans les végétaux, dans les algues, les mollusques, les poissons (dans les zones proches des rejets d'installations nucléaires), dans les organismes des humains et des animaux.

D'où vient-il ?

De tout temps, l'action des rayons cosmiques sur l'hydrogène de la vapeur d'eau atmosphérique et sur les divers composants de l'atmosphère a produit du Tritium, quelques grammes par an.

Mais les essais nucléaires en ont injecté dans l'atmosphère des quantités beaucoup plus importantes, des centaines de kilogrammes (kg). Une estimation tirée de la littérature donne pour la période allant de 1945 à 1962 une quantité de l'ordre de 650 kg, soit plus de 35 kg par an sans compter les « incidents » et « accidents advenus sur les installations pendant la période (Cf. Jean-Claude Amiard « les accidents nucléaires militaires »).

Quant aux installations nucléaires, réacteurs, cycle du combustible, fabrication des têtes nucléaires (site de Valduc), elles rejettent copieusement de l'eau tritiée dans l'environnement en plus des rejets gazeux.

Que nous fait-il ?

(Pour cette partie je me réfère à un article du Docteur Abraham Béhar (GSIEN) et Francine Cohen-Boulakia publié dans Médecine et Guerre Nucléaire (mars 2008) : Le tritium ? C'est grave docteur ?

« *Les modes de pénétration du tritium gaz, de l'eau tritiée et des molécules organiques « OBT » sont radicalement différents :*

- *le tritium gaz pénètre dans le corps humain par voie respiratoire, mais également au travers de la peau (voie transcutanée),*

- *l'eau tritiée pénètre par ingestion d'eau de boisson,*

- *la forme OBT est uniquement ingérée par la nourriture.*

La répartition dans l'organisme est très différente :

• *Le tritium gaz inhalé se répartit dans tous les tissus mous, mais son assimilation est environ 1000 fois plus faible que celle de l'eau tritiée. Sa $\frac{1}{2}$ vie effective (qui tient compte de sa $\frac{1}{2}$ vie physique – période de décroissance radioactive – et de sa $\frac{1}{2}$ vie biologique – le temps au bout duquel l'organisme a éliminé la moitié de la quantité initiale) est d'environ 10 jours.*

• *L'eau tritiée se répartit dans l'ensemble des compartiments hydriques de l'homme, c'est à dire à la fois extra et intra cellulaire. Elle est éliminée par transpiration et excrétion urinaire. Mais environ 3% se transforme en OBT. Sous cette forme, le tritium reste plus longtemps dans l'organisme. La $\frac{1}{2}$ vie ((biologique) est au maximum de 40 jours.*

• *Les OBT vont entrer dans le métabolisme et le comportement va être dominé par la nature du composant organique affecté et la $\frac{1}{2}$ vie est au maximum de 550 jours ».*

Jusqu'à présent nous n'avons envisagé que les effets du rayonnement bêta, cet électron de faible énergie, donc de faible parcours, émis lors de la décroissance radioactive de l'atome de tritium.

Effectivement si cet atome de tritium remplace un atome d'hydrogène « standard » sur une protéine constitutive de l'ADN ou de l'ARN, le bêta a une certaine probabilité d'occasionner quelques dégâts dans un noyau cellulaire. Des travaux conduits par quelques radio biologistes utilisant de la thymidine tritiée ont fait avancer la connaissance et donc la reconnaissance d'effets beaucoup plus importants sur les mitochondries conduisant à l'apparition de l'*apoptose* cellulaire (la mort programmée).

(Note pour les puristes : la thymidine n'est pas une protéine mais l'une des 4 petites briques qui servent à construire l'ADN. Elle s'incorpore directement dans le matériel génétique de la cellule, donc dans le noyau)

Mais il y a un autre effet qui recommence tout juste à être étudié.

Après avoir « craché » son bêta, que devient notre noyau de tritium ? Un noyau d'hélium de masse 3 ... et que je sache, on ne connaît pas de molécule organique constitutive de l'espèce humaine contenant un atome d'hélium lié.

Donc cet atome « étranger » va s'évader et, à sa place, va se créer un radical libre ... qui ne demande qu'à se rattacher à tout ce qui passe à proximité. Et là, on voit apparaître la possibilité de mutations ...

Le caractère nocif des radicaux libres est largement reconnu, c'est même la base d'un juteux business de produits « détoxifiants », « anti radicaux libres », mais à ma connaissance, jusqu'à présent cette propriété du tritium OBT a été « oubliée ». Il y a tout juste un « frémissement à l'IRSN » où commence à être pris en compte l'effet des radicaux libres comme facteurs létaux pour la paroi vasculaire.

Note : Lors de profondes opérations s'apparentant à de la spéléologie, j'ai exhumé de mes archives concernant le nucléaire (près d'une cinquantaine d'années), un rapport concernant LES RISQUES LIÉS A L'INCORPORATION DU TRITIUM PAR L'ORGANISME, rédigé par Madame Anne CHABANEL, qui bien que non daté, en raison des dates des références citées, se situe vers 1975.

De nombreuses références montrent que les effets dus à la transmutation du tritium OBT étaient, dans les années 60, l'objet de travaux de recherche. Mais cet axe de recherche a mystérieusement disparu pendant de nombreuses années des paillasses de la majorité des radio biologistes.

Se pourrait-il que des recherches conduites en ce domaine puissent avoir quelque incidence vis à vis des normes de rejet du tritium par les diverses activités nucléaires ? Quelle horreur !!!!

L'auteur de ce rapport écrit « *il semble que les techniques plus élaborées révèlent des altérations génétiques spécifiques, conséquences de l'effet de transmutation du tritium en hélium.* »

Et en conclusion de ce chapitre, elle écrit ; « *Pour arriver à une plus juste estimation des effets biologiques dus à l'incorporation du tritium dans les tissus, il faut dans le calcul de la dose absorbée, faire apparaître la non uniformité du milieu irradié, et tenir compte des graves transformations moléculaires dues à l'effet de transmutation.* »

Ces problèmes sanitaires sont à suivre avec attention.

Note mémorielle : Pendant ma période au fort d'Aubervilliers, l'armée fut confrontée à un « petit » problème.

A cette époque, tous les cadrans devant pouvoir être lus dans l'obscurité, avaient un dépôt, comme pour l'horlogerie, fait d'un produit phosphoré imprégné de sels de radium. Cela avait créé la crise des cancers parmi les ouvrières de la région de Besançon qui effectuaient ces dépôts.

L'armée, suivant ses principes, avait des stocks de ce genre de cadrans, soigneusement rangés dans des hangars, militairement gardés jours et nuits.

Mais les bidasses assurant ces gardes prenaient de sérieuses doses.

Donc il fut décidé de demander aux fabricants de mettre en œuvre une technique non (ou moins) irradiante. Plusieurs fournisseurs traditionnels de l'armée se mirent au boulot et arrivèrent à Aubervilliers divers échantillons, chargés en tritium. Toujours méfiants, les militaires voulurent connaître les quantités qui leur étaient facturées. Et cela me tomba dessus.

Première décision hiérarchique : on va mettre en solution ... et ce fut confié à la STA Z. Après opération, il ne restait plus rien de radioactif ... tout était parti à la hotte ...

Donc seconde manip : on broie consciencieusement le produit et on le mélange au scintillateur liquide d'un carbo-trimètre (notre service disposait de 2 de ces appareils, un Lie Belin et un Packard) et youpi, on a pu mesurer le tritium. Je ne sais pas quel est le taux de régurgitation du tritium de ces mélanges luminescents... mais c'est à voir.

Seconde note mémorielle : Un jour, mon patron du labo au Collège de France, Francis Perrin (pas l'acteur, mais le fils de Jean Perrin, grand Physicien), professeur au CDF, mais également Haut-Commissaire du CEA, fit une déclaration reprise par Libération :

« *L'élévation du niveau d'irradiation reçue par la population polynésienne en provenance des essais nucléaires, est inférieure à celle due à l'élévation de leur niveau de vie qui leur permet de s'acheter des montres à cadran lumineux.* »

J'avais affiché la page du journal dans le labo, ce qui ne fut pas apprécié par la direction ...

ITER est une vitrine des défauts de l'énergie de fusion

Daniel Jassby, physicien émérite, spécialisé en physique de la fusion nucléaire, Université de Princeton
Thierry Pierre (traduction), physicien des plasmas, Centre National de la recherche Scientifique
 25 juin 2019

Il y a un an, j'ai fait paraître un article critiquant la fusion nucléaire comme source d'énergie, intitulée « Les réacteurs de fusion : ils ne sont pas ce qu'ils sont censés être ». Cet article a suscité beaucoup d'intérêt, si l'on en juge par les très nombreux commentaires. Par conséquent, on m'a demandé d'écrire une suite et de poursuivre la conversation avec les lecteurs du Bulletin of Atomic Scientists. Mais dans un premier temps je vais rappeler quelques éléments pour les nouveaux lecteurs.

Je suis chercheur-physicien ayant travaillé sur plusieurs expériences de fusion nucléaire pendant 25 ans à Princeton au Laboratoire de Physique des Plasmas dans le New Jersey. Mes domaines de recherche portaient sur différents sujets en physique des plasmas et sur la production de neutrons liée aux recherches et aux développements de l'énergie de fusion. Maintenant que je suis à la retraite, j'ai commencé à regarder l'ensemble des recherches en fusion nucléaire de manière plus détachée, et j'ai le sentiment qu'un réacteur de fusion commercial, quotidien, causerait plus de problèmes qu'il n'en résoudrait.

Je me sens donc obligé de dissiper une part de l'aura qui a été développée autour de la fusion nucléaire, qui a été régulièrement annoncée comme la source d'énergie « parfaite » et présentée trop souvent comme la solution-miracle aux problèmes énergétiques mondiaux. Mon article paru l'année dernière a démontré que ces caractéristiques de perfection énergétique proclamées à l'infini (habituellement « inépuisable, bon marché, propre, sûre et sans radiations ») ne résistent pas devant les dures réalités, et qu'un réacteur de fusion serait en fait proche du contraire d'une source d'énergie idéale. Cette discussion a largement porté sur les inconvénients des réacteurs de fusion conçus actuellement, tandis que les promoteurs de la fusion continuent d'insister sur le fait qu'un jour ces problèmes seront surmontés.

Maintenant cependant, nous sommes à un point où, pour la première fois, nous pourrions étudier une installation de réacteur de fusion au stade de prototype : le réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER), en construction à Cadarache, en France. Même si l'achèvement du réacteur est encore éloigné, le projet ITER est suffisamment avancé pour que nous puissions l'examiner comme un test pour la filière tokamak, l'approche actuellement la plus prometteuse pour obtenir une énergie de fusion terrestre basée sur le confinement magnétique. En décembre 2017, la direction du projet ITER a annoncé que 50% de la construction avait été réalisée. Cette étape importante rend confiant dans l'achèvement de ce qui sera la seule installation sur Terre qui ressemble à peu près à ce qu'est censé être un réacteur de fusion pratique. Comme l'a écrit le New York Times, cette installation « est en cours de construction pour tester un rêve de longue date : la fusion nucléaire, la réaction atomique qui se produit au cœur du soleil et dans les bombes à hydrogène, peut être contrôlée pour générer de l'énergie ».

Les physiciens des plasmas considèrent ITER comme le premier dispositif de confinement magnétique capable de produire un "plasma en phase thermonucléaire", où le

chauffage par les particules alpha générées dans les réactions de fusion devient le moyen dominant pour maintenir la température du plasma. Cette condition exige que la puissance de fusion soit au moins égale à cinq fois la puissance de chauffage externe appliquée au plasma. Malgré le fait que cette énergie de fusion consiste en chaleur et non pas en électricité, le projet ITER est principalement présenté comme une étape essentielle sur la voie vers une centrale électrique de fusion nucléaire réelle, et c'est cette assertion que nous analysons dans ce document.

Voyons ce que l'on peut déduire des inconvénients éventuellement irrémédiables des installations de fusion en analysant le projet ITER, en mettant l'accent sur quatre points : la consommation d'électricité, les pertes en tritium, l'activation par les neutrons et les besoins en eau de refroidissement.

Un slogan mal choisi. Sur le site web d'ITER, on est accueilli par la proclamation « Unlimited Energy », qui est aussi le cri de guerre des amateurs de fusion nucléaire partout dans le monde. L'ironie de ce slogan n'est apparemment pas perçue par le personnel du projet et elle n'est pas indiquée au public. Mais quiconque a suivi la construction sur le site d'ITER au cours des cinq dernières années - et il est facile de le faire au vu des photos détaillées et des descriptions sur le site Web du projet - aura été frappé par l'énorme quantité d'énergie investie.

Le site web indique implicitement cet investissement énergétique considérable, dépeignant chacun des sous-systèmes d'ITER comme le plus prodigieux de son genre. Par exemple, le cryostat, ou réfrigérateur à hélium liquide, est le plus grand récipient à vide en acier inoxydable au monde, tandis que le tokamak lui-même peut peser jusqu'à trois fois le poids de la Tour Eiffel [10 100 t]. Le poids total de l'installation centrale d'ITER est d'environ 400 000 tonnes, dont les composants les plus lourds sont 340 000 tonnes pour les fondations et les bâtiments du complexe tokamak et 23 000 tonnes pour le tokamak lui-même.

Mais les thuriféraires du projet devraient être inquiets plutôt qu'en extase devant ces chiffres, parce que cela signifie de grandes dépenses de capitaux et de grands investissements d'énergie, qui doivent apparaître du côté négatif dans le bilan énergétique. Et cette énergie aura été largement fournie par des combustibles fossiles, laissant une empreinte carbone considérablement élevée pour la préparation du site et pour la construction de toutes les installations de soutien, ainsi que pour le réacteur lui-même. Des combustibles fossiles sont brûlés dans l'extraction, le transport et l'affinage des matières premières nécessaires pour fabriquer les composants du réacteur de fusion et éventuellement lors du processus de fabrication lui-même. On peut se demander comment cette énergie dépensée pourrait être compensée finalement par le succès du réacteur - et bien sûr, ce ne sera pas le cas. Mais ce formidable investissement énergétique ne représente que la première composante de l'ironique "Energie Illimitée" vantée par le projet.

Tout près de ces bâtiments se trouve un poste électrique de

quatre hectares avec des sous-stations énormes traitant jusqu'à 600 MW d'électricité, provenant du réseau électrique régional, ce qui serait suffisant pour alimenter une ville de taille moyenne. Cette puissance sera nécessaire pour alimenter les besoins opérationnels d'ITER ; aucune énergie ne circulera jamais vers l'extérieur, car la conception d'ITER rend impossible la conversion de la chaleur de fusion nucléaire en électricité. Rappelez-vous qu'ITER est une installation d'essai conçue uniquement pour prouver la pertinence de la conception des ingénieurs pour imiter le fonctionnement interne du soleil pour fusionner les atomes d'une manière contrôlée ; ITER n'est pas destiné à produire de l'électricité.

La sous-station électrique est une indication de la grande quantité d'énergie qui sera dépensée dans l'exploitation du projet ITER - et même dans toutes les grandes installations de fusion nucléaire. Comme je l'ai souligné dans mon précédent article, les réacteurs de fusion et les installations expérimentales doivent pouvoir répondre à deux types de consommation électrique. Premièrement, une foule de systèmes auxiliaires essentiels tels que les cryostats, les pompes à vide, le chauffage, la ventilation et le refroidissement doivent être maintenus en permanence, même lorsque le plasma de fusion n'est pas présent. Dans le cas d'ITER, cette puissance non-interruptible varie entre 75 et 110 MW, écrit J. C. Gascon et ses co-auteurs dans leur article de janvier 2012 dans *Fusion Science & Technology*, « Design and Key Features for ITER Electrical Energy Distribution. »

La deuxième catégorie de consommation de puissance est directement liée au plasma lui-même, dont le fonctionnement est impulsif. Pour ITER, au moins 300 MW seront nécessaires pendant des dizaines de secondes pour chauffer le plasma et établir les courants requis dans le plasma. Pendant la phase d'exploitation d'une durée maximale de 400 secondes, environ 200 MW seront nécessaires pour maintenir la fusion et contrôler la stabilité du plasma. Même au cours des huit prochaines années de construction comportant des interruptions éventuelles, la consommation d'énergie sur le site atteindra au moins 30 MW en moyenne, ce qui ajoutera à l'énergie investie et servira de banc d'essai pour la puissance non-interruptible. Mais une grande partie de ces informations sur les puissances requises et sur la nécessaire distinction à établir avec la génération de chaleur attendue sur ITER n'a pas été indiquée lorsque le projet a été rendu public.

Energie électrique comparée à l'énergie thermique. Récemment, le site Internet « New Energy Times » a présenté un compte-rendu bien documenté, "Le mythe de l'amplification de puissance sur ITER", sur le fait que le département de la communication d'ITER diffusait des informations mal rédigées sur le bilan énergétique d'ITER et sur le fait qu'il trompait les médias. En effet, une déclaration largement répandue est que "ITER produira 500 mégawatts de puissance de sortie avec une puissance d'entrée de 50 mégawatts", ce qui implique que les deux chiffres se réfèrent à l'énergie électrique.

Le journal *New Energy Times* a montré clairement que les 500 MW attendus en production font référence à l'énergie de fusion (portée par les neutrons et par les particules alpha), qui n'a rien à voir avec une énergie électrique. L'apport de 50 MW mentionné ici est la puissance de chauffage injectée dans le plasma pour aider à maintenir sa

température et son courant, et ce n'est qu'une petite fraction de la puissance d'entrée électrique totale du réacteur. Cette dernière variera entre 300 et 400 MW, comme expliqué précédemment.

La critique technique parue dans *New Energy Times* est fondamentalement correcte et elle attire l'attention sur la puissance électrique colossale exigée par toute installation de fusion. En fait, il a toujours été reconnu qu'une énorme quantité d'énergie est nécessaire pour démarrer tout système de fusion nucléaire. Mais les systèmes de fusion de type tokamak nécessitent également des centaines de mégawatts d'énergie électrique pour être maintenus en fonctionnement. Dans ce qui semble une réponse aux critiques de *New Energy Times*, le site Web d'ITER et d'autres sites de communication tels que Eurofusion ont corrigé certaines déclarations trompeuses concernant le flux d'énergie produite.

Pourtant, la communication au sujet d'ITER pose des problèmes beaucoup plus graves que l'annonce trompeuse des puissances d'entrée et de sortie du réacteur. Alors que la puissance électrique nécessaire de 300 MW est tout à fait incontestable, la question fondamentale est de savoir si ITER produira 500 MW de « quelque chose », une question essentielle qui a trait au gaz tritium nécessaire. En effet, il faut analyser son approvisionnement, la possibilité réelle de l'utiliser, ainsi que le programme technologique nécessaire pour optimiser son utilisation dans le réacteur.

Les vicissitudes de l'élément tritium. Le combustible de fusion le plus réactif est un mélange 50-50 des isotopes de l'hydrogène qui sont le deutérium et le tritium. Ce carburant nucléaire (souvent écrit comme "D-T") a une production de neutrons de fusion 100 fois supérieure à celle du deutérium seul et il induit des conséquences considérables en termes de rayonnement. Le deutérium est présent dans l'eau ordinaire, mais les ressources naturelles en tritium sont presque inexistantes, ce nucléide radioactif ayant une demi-vie de seulement 12,3 années. Le site web d'ITER indique que le tritium sera « pris sur les réserves mondiales en tritium ». Ces réserves consistent en tritium extrait de l'eau lourde des réacteurs nucléaires à fission de type CANDU, principalement en Ontario, au Canada et accessoirement en Corée du Sud, avec un potentiel futur réacteur en Roumanie. Le « stock global » aujourd'hui est d'environ 25 kilogrammes et augmente d'environ 500 grammes par an, notent Muiy Ni et ses co-auteurs dans leur article en 2013, « Tritium Supply Assessment for ITER », dans *Fusion Engineering and Design*. Les réserves mondiales devraient atteindre un maximum avant 2030.

Alors que les « fusionnistes » parlent allègrement de fusionner le deutérium et le tritium, ils ont en réalité une très grande peur d'utiliser le tritium pour deux raisons. Premièrement, il est quelque peu radioactif, donc il y a des problèmes de sécurité liés à son rejet potentiel dans l'environnement. Deuxièmement, il existe une production inévitable de matières radioactives lorsque les neutrons de fusion D-T bombardent le réacteur, ce qui nécessite un blindage amélioré qui entrave grandement l'accès pour la maintenance et induit des problèmes d'élimination des déchets radioactifs.

Au cours de 65 années de recherches en fusion impliquant des centaines d'installations, seuls deux systèmes de confinement magnétique ont déjà utilisé le tritium : le

réacteur de fusion TFTR, tokamak installé autrefois dans mon ancien laboratoire Princeton Plasma Physics Laboratory, et d'autre part le Joint European Tokamak (JET) à Culham, au Royaume-Uni, dans les années 1990. Le planning actuel d'ITER prévoit l'acquisition et la consommation d'au moins un kilogramme de tritium par an. En supposant que le projet ITER soit en mesure d'acquérir une quantité suffisante de tritium et qu'il soit suffisamment téméraire pour l'utiliser, une puissance de fusion de 500 MW sera-t-elle réellement atteinte ? Personne ne le sait.

Le « premier plasma » sur ITER est prévu actuellement pour 2025. Cette étape sera suivie par une période contrainte de 10 ans de continuation de l'assemblage de la machine avec des opérations plasma périodiques utilisant de l'hydrogène et de l'hélium. Ces gaz ne produisent pas de neutrons de fusion, ce qui permettra peut-être de résoudre les problèmes de stabilité du plasma et d'optimiser les performances avec des risques de rayonnement minimaux. En effet, les instabilités du plasma devront être maîtrisées pour assurer un confinement satisfaisant de l'énergie, de telle sorte que le plasma puisse être ensuite chauffé et maintenu à haute température. Les flux d'atomes d'impuretés devront être minimisés.

Le programme d'ITER prévoit l'utilisation de deutérium et de tritium au cours de la fin de la décennie 2030-2040. Mais il n'y a aucune certitude que l'objectif de 500 MW de puissance produite sera atteint. Générer une telle puissance de fusion dépendra en particulier de la mise au point de la technique de l'injection de deutérium et de tritium par des pellets (glaçons de gaz solidifiés), par des faisceaux de particules, par des bouffées de gaz et par le recyclage des gaz. Au cours des premières années 2040, il est probable que la puissance de fusion obtenue sur ITER sera faible, et que davantage de tritium injecté sera perdu par non-récupération que par fusion avec du deutérium.

L'analyse de la phase « tritium » dans ITER indique que seulement 2% du tritium injecté sera brûlé, de sorte que 98% du tritium injecté sortira intact du plasma. Bien qu'une forte proportion s'écoule simplement avec les effluents gazeux du plasma, une grande partie du tritium devra être continuellement récupérée sur les surfaces internes du réacteur, sur les injecteurs de faisceaux, les conduits de pompage et les autres appendices pour le traitement et la réutilisation des gaz. Au cours de leurs dizaines de traversées du « circuit tritium » dans la chambre à plasma, le système de pompage, le retraitement et la séparation isotopique, la réinjection, certains atomes de tritium seront piégés de façon irrémédiable et définitive dans les parois et les composants internes du réacteur ainsi que dans les systèmes de diagnostic et de chauffage.

La pénétration du tritium à haute température dans de nombreux matériaux n'est pas encore comprise aujourd'hui, comme l'expliquent R.A. Causey et ses co-auteurs dans l'article « Les barrières-tritium et la diffusion du tritium dans les réacteurs à fusion », article disponible sur ResearchGate. La migration plus profonde d'une petite fraction du tritium piégé dans les parois, puis dans les canaux de refroidissement liquide et gazeux seront impossibles à empêcher. La plus grande partie du tritium implanté finira par se désintégrer, mais il y aura inévitablement des rejets dans l'environnement par la

circulation de l'eau de refroidissement.

Les concepteurs des futurs réacteurs de type tokamak supposent généralement que tout le tritium brûlé sera remplacé par absorption des neutrons de fusion dans le lithium entourant complètement le plasma en phase réactive. Mais cette idée illusoire ne prend pas du tout en compte le tritium qui est définitivement perdu dans ses pérégrinations à travers les sous-systèmes du réacteur. Comme ITER le démontrera, la quantité de tritium non récupérée sera du même ordre que celle brûlée. Elle pourra être remplacée que par l'achat très coûteux de tritium produit dans des réacteurs à fission.

Radiations et déchets radioactifs de la fusion. Comme indiqué ci-dessus, les 500 MW d'énergie thermique de fusion prévus sur ITER ne sont pas de l'énergie électrique. Mais ce que les partisans de la fusion détestent vous dire, c'est que cette puissance de fusion n'est pas un rayonnement solaire bénin, mais consiste principalement (80%) en un flux de neutrons très énergétiques dont la seule fonction apparente dans ITER est de produire d'énormes volumes de déchets radioactifs en bombardant les parois de la cuve du réacteur et ses composants internes. Seulement 2% des neutrons seront interceptés par des modules d'essai conçus pour étudier la production de tritium à partir du lithium, mais 98% des flux de neutrons vont simplement interagir avec les noyaux des matériaux constituant les parois du réacteur ou dans les dispositifs extérieurs à travers les fenêtres d'accès au réacteur.

Dans les réacteurs à fission, 3% de l'énergie de fission, au maximum, apparaît sous forme de neutrons. Mais ITER s'apparente à un appareil électrique qui convertit des centaines de mégawatts d'énergie électrique en flux de neutrons. Une particularité des réacteurs de fusion D-T est que l'énergie thermique, pour l'essentiel, n'est pas produite dans le plasma en réaction, mais en réalité à l'intérieur des très épais écrans en acier qui entourent le réacteur, et cela lorsque les flux de neutrons interagissent avec ces écrans en dissipant progressivement leur énergie. En principe, cette énergie neutronique thermalisée pourrait en quelque sorte être reconvertie en électricité à très faible rendement, mais le projet ITER a choisi de ne pas relever ce défi. C'est une tâche reportée aux illusoires « réacteurs de démonstration » que les promoteurs de la fusion espèrent déployer dans la seconde moitié du siècle.

Un inconvénient reconnu depuis longtemps de l'énergie de fusion nucléaire est l'endommagement par rayonnement neutronique des matériaux exposés, provoquant un gonflement, une fragilisation et une fatigue. En fait, le temps total de fonctionnement à des taux de production de neutrons élevés dans ITER sera trop faible pour causer des dommages notables pour l'intégrité structurelle du réacteur, mais l'activation neutronique créera pour longtemps une radioactivité dangereuse dans tous les composants exposés du réacteur, produisant finalement 30 000 tonnes de déchets radioactifs.

Entourant le tokamak d'ITER, un cylindre en béton monstrueux de 3,5 mètres d'épaisseur, de 30 mètres de diamètre et de 30 mètres de hauteur appelé « bioshield » empêchera les rayons X, les rayons gamma et les neutrons parasites d'atteindre le monde extérieur. La cuve du réacteur et les composants non-structuraux à la fois à

l'intérieur de la cuve et au-delà jusqu'au bio-écran deviendront hautement radioactifs par activation par les flux de neutrons. Les temps d'arrêt pour maintenance et réparation seront très longs car toute la maintenance devra être effectuée par un équipement de manipulation à distance.

Pour le projet expérimental JET (Joint European Torus) beaucoup plus petit qu'ITER, installé au Royaume-Uni, le volume de déchets radioactifs est estimé à 3 000 mètres cubes, et le coût du démantèlement dépassera 300 millions de dollars, selon le Financial Times. Ces chiffres seront éclipsés par les 30 000 tonnes de déchets radioactifs d'ITER. Heureusement, la majeure partie de cette radioactivité induite se désintègrera en quelques décennies, mais après 100 ans, quelque 6 000 tonnes seront encore dangereusement radioactives et devront être éliminées dans un dépôt, indique la section « Déchets et démantèlement » du rapport final de conception d'ITER. Le transport périodique et l'élimination hors-site des composants radioactifs ainsi que le démantèlement final de la totalité de l'installation du réacteur seront des tâches gourmandes en énergie qui accroîtront encore le côté négatif du bilan énergétique.

La question de l'eau consommée. Des quantités d'eau énormes seront nécessaires pour évacuer la chaleur de la cuve du réacteur d'ITER, évacuer celle des systèmes de chauffage au plasma, des systèmes électriques du tokamak, des réfrigérateurs cryogéniques et des alimentations électriques des aimants. En incluant la production de fusion nucléaire, la charge thermique totale pourrait atteindre 1 000 MW, et cela même avec une puissance de fusion nulle. L'installation du réacteur consomme jusqu'à 500 MW qui finissent par devenir de la chaleur à éliminer. ITER démontrera que les réacteurs à fusion seraient beaucoup plus consommateurs d'eau que tout autre type de générateur d'énergie, en raison des très nombreuses dissipations parasites qui se transforment en chaleur supplémentaire devant être dissipée sur place (par "parasite", nous entendons : qui consomment une partie de la puissance même que produit le réacteur.)

L'eau de refroidissement sera prélevée sur le Canal de Provence formé par la canalisation de la Durance, et la plus grande partie de la chaleur sera rejetée dans l'atmosphère par des tours de refroidissement. Pendant les opérations de fusion nucléaire, le débit combiné de toutes les eaux de refroidissement sera de l'ordre de 12 mètres cubes par seconde, soit plus du tiers du débit du canal. Ce débit pourrait alimenter une ville de 1 million d'habitants. (Mais la demande réelle sur l'eau du canal sera seulement une très petite fraction de cette valeur parce que la phase de puissance sur ITER ne durera que 400 secondes avec 20 tirs quotidiens tout au plus, et une partie de l'eau de refroidissement d'ITER est recyclée).

Même si ITER ne produit que des neutrons, son débit maximum de liquide de refroidissement sera toujours près de la moitié de celui d'une centrale au charbon ou d'une centrale nucléaire fonctionnant à plein régime et produisant 1 000 MW d'énergie électrique. Dans ITER, au moins 56 MW d'énergie électrique seront consommés par les pompes qui font circuler l'eau à travers quelque 36 kilomètres de tuyauterie de qualité nucléaire.

L'exploitation de n'importe quelle grande installation de fusion telle que ITER est possible seulement dans un endroit comme la région de Cadarache en France, avec un accès à beaucoup de réseaux électriques de haute puissance aussi bien qu'à un système d'eau fraîche à haut débit. Au cours des dernières décennies, la grande abondance de débits d'eau douce et l'eau froide et illimitée des océans ont permis la mise en place d'un grand nombre de centrales thermoélectriques d'une puissance de l'ordre du gigawatt. Compte tenu de la raréfaction de l'eau douce et même de l'eau froide dans le monde entier, la difficulté de fournir de l'eau de refroidissement rendrait difficilement possible le déploiement futur des réacteurs de fusion nucléaire.

L'impact d'ITER. Que le réacteur ITER fonctionne ou non, son héritage le plus favorable est que, comme la Station Spatiale Internationale, il aura donné un exemple impressionnant d'une coopération internationale durant plusieurs décennies entre des nations à la fois amicales ou semi-hostiles. Les critiques affirment que la collaboration internationale a considérablement amplifié les coûts et les délais, mais un coût de 20 à 30 milliards pour ITER n'est pas disproportionné avec celui d'autres grandes entreprises nucléaires, comme les centrales électriques dont la construction a été approuvée ces dernières années aux États-Unis (SOMMER et VOGTLE) et en Europe occidentale (Hinkley Point et Flamanville), ou encore le projet de développement du combustible nucléaire US MOX à Savannah River. Tous ces projets ont connu un triplement des coûts et les délais de construction ont gonflé d'année en année. Le problème sous-jacent est que toutes les installations d'énergie nucléaire - que ce soit la fission ou la fusion - sont extraordinairement complexes et exorbitantes.

Un deuxième rôle inestimable d'ITER sera son influence définitive sur la planification de l'approvisionnement en énergie au niveau mondial. En cas de succès, ITER pourrait permettre aux physiciens d'étudier des plasmas de fusion à haute température maintenus pendant des temps longs. Mais considéré comme un prototype de mode de production d'énergie, ITER sera manifestement une source de neutrons dévastatrice alimentée par le tritium lui-même produit dans des réacteurs à fission. Le réacteur ITER sera alimenté par des centaines de mégawatts d'électricité du réseau électrique régional et exigera des ressources en eau de refroidissement sans précédent. Les dommages causés par les neutrons seront sans précédent, tandis que les autres défauts perdureront dans tout autre réacteur à fusion qui tentera de produire suffisamment d'électricité pour essayer de compenser toutes les nombreuses pertes d'énergie mentionnées ci-dessus.

Finalement, confrontés à cette réalité, même les promoteurs d'une nouvelle énergie nucléaire les plus optimistes devraient abandonner la fusion. Plutôt que d'annoncer l'avènement d'une nouvelle ère énergétique, il est probable qu'ITER jouera un rôle analogue à celui du surgénérateur à fission rapide, dont les inconvénients flagrants ont mis fin à cette filière prétendue également source d'énergie illimitée et qui a finalement permis la prédominance actuelle des réacteurs classiques à fission dans le domaine de l'énergie nucléaire.

[Jassby, 2018]

Stress, peur, pression : le difficile quotidien des salariés du réacteur nucléaire Iter

Reporterre, 2 mars 2022

Des anciens employés d'Iter et syndicalistes alertent sur la « gestion par la peur » et le « management toxique » de l'organisation. Selon leurs témoignages, celle-ci n'hésite pas à recourir aux pressions et licenciements pour dissimuler les dangereux défauts du réacteur expérimental.

En construction à Cadarache dans les Bouches-du-Rhône depuis 2006, le réacteur expérimental Iter devait être la vitrine mondiale de la technologie de fusion nucléaire. Projet de coopération scientifique réunissant trente-cinq pays, il devait démontrer que l'on pouvait produire une source d'énergie « *illimitée et inépuisable* » avec seulement quelques kilos de tritium radioactif et presque aucun déchet. Mais le coût de ce chantier pharaonique est passé de 5 milliards à plus de 40 milliards d'euros, il a accumulé dix ans de retard et le projet s'avère bien plus risqué que prévu. Des lanceurs d'alerte ont averti la Commission européenne, qui finance Iter pour près de moitié via Euratom, et l'Office européen de la lutte anti-fraude sur le fait qu'Iter se poursuit depuis des années au détriment de la santé du personnel et de la sûreté.

« *L'Organisation Iter a instauré une gestion par la peur* », a déclaré ce lundi 28 février Michel Claessens, directeur de la communication de 2011 à 2015 et « ITER policy officer » à la Commission européenne de 2016 à 2021. « *Mes collègues subissent un stress insupportable, une peur omniprésente, la peur de parler. Il y a dans ce projet de pointe une omerta scientifique. Elle conduit à des dérives inacceptables concernant le personnel et la radioprotection.* » Il était entendu lors d'une réunion exceptionnelle consacrée au projet Iter par la Commission de contrôle budgétaire du Parlement européen. Bernard Bigot, directeur de l'Organisation d'Iter, a annulé sa participation à la réunion au Parlement européen, expliquant dans un message qu'« il ne souhaitait pas s'exprimer en présence de Michel Claessens ». Cette rencontre a été organisée suite au rapport accablant de cet ancien directeur de la communication, spécialiste de la fusion, et au suicide en mai 2021 d'un ingénieur italien de 38 ans au sein de l'agence Fusion 4 Energy de Barcelone, qui coordonne le projet Iter au niveau européen (lire le rapport de Michel Claessens [ici](#)).

Dans la lettre qu'il a laissée, l'employé expliquait son geste par un « *effondrement professionnel* » lié au fait d'avoir été « *traité en bouc émissaire et humilié au dernier degré* ». Un premier audit, dont les conclusions mettaient en doute le lien entre ce suicide et les conditions de travail, a provoqué une grève du personnel de Fusion 4 Energy à Barcelone en novembre dernier. Une tentative de suicide et deux décès par crise cardiaque sont survenus à la même période sur le site Iter de Cadarache. Pour Cristiano Sebastiani, président du syndicat de la fonction publique européenne Renouveau et Démocratie, qui s'est exprimé au Parlement européen ce lundi, « *c'est le résultat de plusieurs années de management toxique* ». « *Si personne ne peut exprimer la moindre critique, commente le syndicaliste pour Reporterre, l'institution se prive d'un dispositif d'alerte indispensable* ».

200 millions de degrés

Cette condition paraît d'autant plus cruciale que l'expérimentation prévue à Iter consistera, dans un bâtiment réacteur de 440 000 tonnes (40 fois la tour Eiffel), à tenter

de « *domestiquer l'énergie de la bombe H* ». Il s'agit de déclencher une réaction de fusion thermonucléaire en chauffant des atomes à une température approchant les 200 millions de degrés (dix fois la température du centre du soleil) et de confiner ce plasma instable dans le réacteur au moyen de champs électromagnétiques très puissants. Des neutrons irradieront la surface de la chambre à vide du gigantesque réacteur, dont il faudra garantir l'étanchéité tout en traitant les déchets radioactifs issus de la réaction et du refroidissement.

Or selon Michel Claessens, « *le "bioshield" de trois mètres d'épaisseur qui entoure le tokamak et protège les travailleurs ainsi que l'environnement, à cause d'erreurs dans la conception et la construction des murs* » offrira une protection « *de 30 % inférieure à celle projetée* ». Il a informé l'Union européenne que « *le responsable de l'assemblage [du réacteur] a démissionné parce qu'on lui imposait de faire de faux témoignages* » et que « *trois personnes ont été licenciées pour avoir refusé d'installer sans les tester des pièces qui présentaient un risque mortel pour le personnel de maintenance* ».

On apprend aussi qu'une directrice de la sécurité du site de Cadarache a été licenciée sans préavis dès la parution d'un article de Reporterre où [elle reconnaissait la dangerosité de certaines poussières radioactives](#) qui seraient émises lors de la réaction et remettait en cause la fusion comme « *énergie propre et sans déchets* ». Selon Michel Claessens, elle a découvert son sort « *en consultant distraitemment la liste mensuelle des collègues en partance de l'Organisation* ».

L'un des principaux risques d'Iter est lié à la nature du matériau qui recouvrira la paroi interne du réacteur : le béryllium, un métal ultrarésistant au point de fusion très élevé. Aussi toxique que l'arsenic, le mercure ou l'amiante, il peut provoquer des maladies pulmonaires incurables et des cancers du poumon, même dans des quantités infimes.



[Red !](#)

Le GSIN est une association loi 1901 qui a été créée en 1975, suite à l'appel des 400 de février 1975, appel de scientifiques dont 200 physiciens nucléaires. Cet appel "A propos du programme nucléaire français" se concluait sur les phrases suivantes : "Nous pensons que la politique actuellement menée ne tient compte ni des vrais intérêts de la population ni de ceux des générations futures, et qu'elle qualifie de scientifique un choix politique. Il faut qu'un vrai débat s'instaure et non ce semblant de consultation fait dans la précipitation. Nous appelons la population à refuser l'installation de ces centrales tant qu'elle n'aura pas une claire conscience des risques et des conséquences. Nous appelons les scientifiques (chercheurs, ingénieurs, médecins, professeurs) à soutenir cet appel et à contribuer, par tous les moyens, à éclairer l'opinion."

SES ACTIVITÉS : Alors que les nombreux dysfonctionnements dans la construction des réacteurs tels que les déboires des EPR actuellement en constructions, montrent l'absence de mémoire des industriels du nucléaire, depuis 1976, le GSIN suit et surveille cette industrie dangereuse depuis plus de 40 ans sans discontinuer. Composé de scientifiques, d'experts reconnus, de travailleurs du nucléaire et de militants, le Groupe s'est doté d'un journal "La Gazette Nucléaire" qui a publié près de 300 numéros et près de 200 dossiers thématiques et édité plusieurs livres. De Three Mile Island (1979) en passant par Tchernobyl (1986) et Fukushima (2011), le GSIN suit constamment l'actualité de l'industrie nucléaire et intervient régulièrement dans les organismes officiels où il est représenté. Il répond aux nombreuses demandes du public mais aussi des enseignants, journalistes et associations écologistes. Le GSIN est en particulier engagé dans l'Association Nationale des Comités et Commissions Locales d'Information (ANCCLI) et participe à son Comité Scientifique. Il travaille aussi directement avec les Commissions Locales.

LE CONTEXTE ACTUEL : Chaque jour apporte son lot de révélations inquiétantes sur le fonctionnement du parc nucléaire, le risque majeur n'est plus une vue de l'esprit, le parc vieillit, les rejets radioactifs continuent, le débat sur la transition énergétique en France et ailleurs est relancé. Pourtant, la capacité technique de construire un nouveau réacteur n'est pas démontrée (déboires de l'EPR de Flamanville), pas plus que celle de mettre en œuvre une « gestion sûre » des déchets les plus dangereux. La mise en doute de la validité technico-économique d'un renouvellement du parc nucléaire est de plus en plus prégnante ! Fromage et dessert : Que dire des sites qui restent souillés (mines, usines, sites d'essais militaires...) sans qu'une proposition sérieuse de remise en état soit envisagée ou encore du démantèlement qui reste au stade des balbutiements y compris sur l'estimation des fonds à provisionner ?

Plus que jamais, l'existence d'une expertise scientifique indépendante est nécessaire pour informer la population, alerter les acteurs de la filière et interpeller le pouvoir politique. Dans ce contexte, le GSIN doit poursuivre et renforcer son activité grâce au soutien et à la participation d'un plus grand nombre de membres de la communauté scientifique, de chercheurs de toutes disciplines et de militants de terrain. Après 45 ans d'expertise "pluraliste", l'ambition du GSIN est de permettre au plus grand nombre de s'approprier les connaissances accumulées, de renforcer sa capacité d'intervention dans le débat public et d'assurer l'enrichissement et la relève de cette expertise pluraliste.

SOUTENIR LE GSIN : C'EST IMPORTANT !

<https://gazettenucleaire.org/>

Bulletin d'abonnement (adhésion, voir au dos)

À découper et à renvoyer avec le titre de paiement (CCP ou chèque bancaire) à l'ordre du GSIN :
GSIN – 2 Allées François Villon – 91400 ORSAY

Nom : (en majuscules)

Prénom :

Adresse :

Code Postal :

Ville :

Téléphone :

Email :

Je m'abonne à la Gazette Nucléaire :

oui •

non •

(Pour un an : France : 24 € - Étranger : 30 € - Soutien : 30 € ou plus)