

Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur  
Groupe Europe Ecologie/les Verts, Partit Occitan

# ITER

**International Thermonuclear Experimental Reactor**

Rapport d'étape, juin 2014  
et mise à jour en janvier 2015

Alain NICOLAS, Conseiller Régional  
Thierry PIERRE, CNRS, physicien des plasmas, Directeur de Recherches

## Résumé

Le présent rapport tient compte des aspects scientifiques et techniques les plus récents qui concernent le projet ITER mais aussi des aspects financiers et de calendrier, soulignés fortement ces derniers mois par le groupe EELV au Président du CR PACA.

*Sa nouveauté tient dans la constatation qu'il n'est plus sérieusement envisageable, notamment en termes de coûts, de ne pas obtenir davantage d'assurances à court, moyen et long terme sur la réussite de ce projet.*

Nous devons donc intégrer dans nos réflexions sur la transition énergétique que la production d'une électricité de fusion, but du programme ITER, n'est simplement que du domaine du possible à l'horizon 2100-2130.

Le grand retard constaté dans l'avancement du projet a pour conséquence une modification du programme de recherche lui-même pour la raison fondamentale que l'un des « carburants » d'ITER, le gaz radioactif tritium, aura largement disparu à la date de mise au point finale des éléments du réacteur destinés à fabriquer le tritium in situ, rendant particulièrement difficile une mise au point de ces éléments dans les temps impartis dans le projet initial. Cette situation modifie le projet dans son ensemble. Cette modification par rapport au projet présenté en 2003-2005 à la Région PACA nécessite une redéfinition objective et sincère par ITER-Organization des objectifs du projet afin que la Région PACA dispose de l'intégralité des informations lui permettant de continuer à soutenir éventuellement le projet actualisé.

L'audition des experts a permis de mettre en évidence deux conséquences dans l'hypothèse d'un demi-succès ou d'un demi-échec du projet :

- si la mise au point d'un réacteur de fusion à Cadarache s'avère, *in fine*, impossible, un des scénarios de substitution est la transformation en un réacteur expérimental hybride de fission/fusion, ou en un réacteur-breeder c'est à dire fabricant du combustible nucléaire (plutonium) pour les centrales à fission classiques. C'est la position de Monsieur Paul-Henri Rebut, le premier concepteur d'ITER. **Cette solution est inacceptable.**

- il devient inévitable, vu le contexte, notamment, du réchauffement climatique rapide et des urgences diverses qui surgissent partout dans le monde, de mettre rapidement en place à Cadarache les conditions de recherches ambitieuses sur les énergies alternatives, et principalement sur le solaire.

## ITER : rapport d'étape, janvier 2014

Après avoir écouté, lu, entendu, rencontré les scientifiques reconnus dans les domaines couverts par le projet global ITER\*, nous constatons que, « *si tout va bien* », *l'électricité produite par la fusion nucléaire apparaîtra sur le marché entre 2100 et 2130.*

EELV sait que certains paris doivent être faits pour que les progrès scientifiques produisent des effets sur l'Homme et son environnement, mais ces paris doivent être raisonnablement délimités sur le plan scientifique, sur le plan financier, sur le plan du calendrier et sur celui de la gestion de l'ensemble. Par courrier du 21 juillet 2011, le groupe EELV avait saisi le Président du CR PACA de l'ensemble de ces problèmes.

Or, ainsi que le reconnaissent les scientifiques attachés au projet ITER, *des incertitudes multiples demeurent sur le succès des recherches et des applications sur la production de l'électricité de fusion.* De nombreuses incertitudes pèsent aussi, d'après ces mêmes sources, sur le plan financier car tous les résultats scientifiques et techniques à venir, dont beaucoup ne peuvent être connus à l'avance, peuvent impacter lourdement le coût total du projet. Les plus optimistes des partisans du projet ITER situent la production d'électricité de fusion aux alentours de 2100 : c'est pourquoi, sans aborder le débat sur le nucléaire (les scientifiques défendant ITER classent la fusion dans le « nucléaire propre », pratiquement sans risques, et dans les énergies « renouvelables »), et face à autant d'inconnues sur de multiples aspects essentiels, *des élus responsables ne peuvent envisager de consacrer de nouveaux budgets à un tel projet.*

Par ailleurs, à de très rares exceptions près, ces scientifiques admettent que l'énergie d'avenir à l'échelle planétaire et sur le long terme, mise à part celle de la fusion, encore hypothétique pour les raisons que nous venons d'évoquer, est l'énergie solaire, et plus particulièrement la Photonique Energétique Solaire au sens large, de l'infrarouge (thermique) à l'ultraviolet (partie la plus énergétique du spectre solaire) . Ils rejoignent en cela un grand nombre d'hommes et de femmes qui, dans de nombreuses institutions, militent depuis des années pour que des moyens de recherches importants soient rapidement mis en place dans ce domaine, alternatif au nucléaire.

Nous demandons par conséquent à l'Académie des Technologies un rapport détaillé sur les perspectives des recherches en énergie solaire.

Nous demandons d'envisager très rapidement une accélération significative et ambitieuse de la Cité des Energies Alternatives basée à Cadarache, centrée prioritairement sur la problématique du solaire : mise au point d'un programme

de recherches, gestion des postes de chercheurs déjà existants, aménagement des locaux prévus dans le projet ITER, recherches de budgets.

*\* Quand nous parlons d'ITER, nous englobons la totalité des différentes phases du projet (ITER, puis DEMO, puis PROTO, puis...) conduisant théoriquement à la production d'électricité de fusion nucléaire.*

**Personnalités consultées et citées pour rédiger ce rapport**, soit directement, soit d'après des publications et /ou des débats radio et télévision :

Robert AYMAR, Sébastien BALIBAR, Edouard BREZIN, Georges CHARPAK, Bruno COPPI, Robert DAUTRAY, Jean-Luc DUCHATEAU, Pierre-Gilles de GENNE, Jean JACQUINOT, Guy LAVAL, Jérôme PAMELA, René PELLAT, Paul-Henri REBUT, Gilbert RUELLE, Weston STACEY, Masatoshi TOSHIBA, Jacques TREINER, Glen WURDEN, Scott WILLMS.

Institutions (publications) :

- Académie des Sciences, Paris
- Académie des Technologies, Paris

Divers :

- Sites Internet d'ITER Organization, du CEA...

- **Guy LAVAL**, physicien des plasmas, Vice-Président de l'Académie (Déclaration radiophonique en 2011) :

*« Si ITER remplit les conditions et répond aux attentes, on passera à l'étape DEMO. Puis, on ne sait pas exactement ce que l'on fera, mais ceci nous permettrait, si tout va bien, si on trouve les bons matériaux, etc... ça nous permettrait théoriquement de construire une usine au début du XXIIème siècle... » (...)*

*« On ne sait pas calculer sur le papier comment va se comporter cette machine. Il y aura peut-être des choses surprenantes... Alors, les choses surprenantes, elles peuvent aller dans le mauvais sens, mais elles peuvent aussi aller dans le bons sens ! Pourquoi pas ? Qui sait ?... On peut tout de même garder le moral... » (...)*

*« L'avenir lointain, c'est le solaire. Mais il faudra le compléter par d'autres sources, nucléaires. » (...)*

- **Jacques TREINER**, physicien, professeur émérite de physique théorique (Université Pierre et Marie Curie). En 2011 au journal « Le Monde », il disait :  
*« Le problème n°1 est celui des matériaux liés au plasma (neutrons qui frappent*

*sur la paroi). On ne sait pas ce qui va se passer, et c'est la condition sine qua non de ITER. » (...)*

- **Académie des Technologies**, (Rapport 2009) : (...) « *A partir de 2080 ? La fusion nucléaire contrôlée entre peut-être en piste* » (...)

- **Sébastien BALIBAR**, , Physicien, Membre de l'Académie des Sciences, CNRS, Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, Universités Paris 6 et 7. (Conférence, 2012) :

« *L'électricité de fusion n'est pas pour le 21ème siècle.* »

(...) « *L'intérêt scientifique d'ITER pour la physique des plasmas est non nul. La véritable justification d'ITER est d'ordre économique : produire peut-être de l'énergie au 22ème siècle.* » (...)

« *Que faire aujourd'hui ? Espérer qu'ITER fonctionnera.* » (...)

- **Weston M. STACEY**, physicien nucléaire (USA) spécialiste des réacteurs fusion-fission, dans une communication à Atlanta en 2011, donne deux calendriers pour ITER : le premier est dit « canonique » (officiel) avec un réacteur prévu fonctionnant en 2060-2080, et un calendrier « plus vraisemblable » le situant entre 2080-2120.

- **Pierre-Gilles De GENNES**, prix Nobel de Physique : (...) « *Croire que ces bobines (d'ITER) pourront résister toute la durée de vie du réacteur est complètement fou.* »

- **Georges CHARPAK**, prix Nobel de Physique (...) « *... mieux vaudrait admettre enfin que le gigantisme du projet ITER est disproportionné par rapport aux espérances...* » (...)

- **Masatoshi TOSHIBA**, prix Nobel de Physique (Japon), 2004 : « *ITER n'est pas la source d'énergie de la prochaine génération...* » (...)  
« *... ITER ne remplit pas un certain nombre de conditions, à savoir la sûreté et les coûts économiques.* » (...)

- **ITER Organization** (2013) : (Communication Internet) « *Si tout se passe comme prévu, DEMO (la continuation d'ITER) inaugurerait l'ère de la fusion industrielle.* » (...)

« *D'ici la fin du siècle, si ITER et DEMO tiennent leurs promesses, l'homme entrera dans l'Ere de la fusion...* »

Etc...

2007

ACADÉMIE DES SCIENCES

**LA FUSION  
NUCLÉAIRE :**  
DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE  
À LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ?

Sous la direction de  
GUY LAVAL



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences



## *Extraits de ce rapport de l'Académie des Sciences (2007)*

(...) Cette consommation extrêmement faible en combustible conduit à estimer que, au vu des ressources prévisibles, la domestication de la fusion libérerait l'humanité de tout risque de pénurie énergétique. C'est le lithium qui viendrait d'abord à manquer, dans plusieurs dizaines de siècles. On peut espérer que les progrès de la science et de la technique permettraient alors de n'utiliser que le deutérium comme combustible, ce qui est possible mais plus difficile. Alors les réserves deviendraient vraiment illimitées.

(...)

Enfin, s'il reste indispensable de se prémunir contre les éventuels incidents, en particulier ceux concernant **la gestion du tritium (\*)**, la sûreté nucléaire d'une telle installation est facile à assurer. Aucune catastrophe majeure n'est à redouter, car un accident par emballement des réactions n'est pas possible.

(...)

Il n'existe pas de moyen, aujourd'hui, permettant de stabiliser le plasma à toutes les échelles de temps et de longueur. Ces instabilités résiduelles maintiennent l'existence de champs électromagnétiques turbulents, avec des fluctuations dont l'amplitude reste assez faible pour être tolérable, mais qui déterminent le transport des particules à travers la configuration magnétique et, donc, la vitesse à laquelle le plasma s'échappe du volume de confinement.

Cette vitesse conditionne le bilan énergétique de la configuration et sa détermination constitue le premier objectif poursuivi dans les recherches sur la fusion par confinement magnétique. Devant l'impossibilité d'un calcul *a priori*, la similarité des régimes de fonctionnement dans les différentes machines a permis d'établir des lois empiriques en rassemblant l'ensemble des résultats. Leur extrapolation guide la conception des machines nouvelles et permet des prédictions sur leurs performances mais elles n'autorisent que des sauts d'amplitude relativement faibles et ne peuvent prédire les changements de régimes de fonctionnement.

Par exemple, les premières lois avaient été établies pour des puissances de chauffage faibles et n'ont pas permis de prévoir un important changement de régime au-delà d'un seuil qui s'est manifesté en effectuant des études systématiques sur un Tokamak de taille moyenne, la machine Asdex. Plus récemment, les expériences sur plusieurs machines ont mis en évidence d'autres régimes de confinement amélioré en effectuant un contrôle fin de la distribution du courant dans le plasma. Là encore, l'absence d'un modèle entièrement

calculable rend difficile l'évaluation des gains espérés de tels effets. Ces limites à l'extrapolation justifient la construction d'une expérience où il soit possible de juger de la valeur réelle de ces progrès dans des conditions jugées directement transposables à un réacteur. C'est la motivation principale qui a conduit à la décision de construire la machine Iter.

(...)

**Il faut rappeler que, devant la quantité de tritium nécessaire pour alimenter un réacteur de fusion thermonucléaire (un réacteur de 900 MWe consomme plus de 300 g de T par jour), il est nécessaire d'utiliser les neutrons issus du plasma pour transmuter le lithium *in situ*, dans des couvertures tritigènes, et assurer ainsi l'autosuffisance du réacteur.**

En tenant compte des quantités de tritium limitées disponibles aujourd'hui, (en 2006, donc) cette condition devra être déjà respectée dans Demo, l'étape suivant Iter. Cette contrainte implique la mise en oeuvre d'un vaste programme de R&D, soutenu par une importante réflexion en termes de conception et d'analyse.

Chaque réaction de fusion consomme un noyau de tritium et produit un neutron de 14 MeV qui peut être utilisé pour produire un noyau de tritium par réaction nucléaire avec un noyau de lithium-6 nécessairement présent dans la couverture. Comme chaque neutron peut produire un seul noyau de tritium, on voit facilement que, si on tient compte des neutrons absorbés par d'autres noyaux dans les matériaux de la couverture (« réactions parasites » et des fuites à travers les zones autour du plasma où il n'y a pas de couverture, telles que la région du divertor), l'autosuffisance en tritium ne peut être atteinte qu'avec l'utilisation de matériaux multiplicateurs de neutrons, *via* les réactions du type (n,2n). Les seuls matériaux multiplicateurs suffisamment performants qu'on peut envisager sont le plomb et le béryllium. En principe, il y a une troisième possibilité...

(...)

**À l'exception du tritium qui sera produit *in situ***, les constituants « combustibles » c'est-à-dire deutérium et lithium, ainsi que les produits de réaction (hélium) ne sont pas radioactifs. L'inventaire des déchets se limitera principalement aux structures primaires (première paroi, divertor, couvertures et chambre à vide) activées par les neutrons **et les circuits du tritium.** (...)

*(\*) Le tritium, est un gaz, isotope radio-actif de l'hydrogène. Rare à l'état naturel, il est produit principalement par les réacteur nucléaires, civils et militaires. Stocké sur place sous haute surveillance, il est très dangereux s'il est inhalé ou ingéré par un être vivant.*

**Commentaires de Jacques TREINER  
(Société Française de Physique)**

(...) Parmi les sources alternatives non productrices de gaz à effet de serre, ou dont le bilan est voisin de zéro, on trouve le solaire, la biomasse (qui indirectement provient du solaire), l'éolien, la géothermie et le nucléaire de fission et de fusion. Parmi ces filières, la seule pour laquelle on ne puisse pas affirmer avec une forte probabilité qu'elle verra un développement industriel à une échelle de temps prévisible est le nucléaire de fusion – l'objet du présent rapport. Ceci, du reste, est clairement dit dans l'introduction (de ce rapport). La conséquence, c'est qu'il s'agit d'une filière qui n'est pas dans les temps de l'urgence climatique à l'échelle du siècle. Cela ne signifie nullement qu'il ne faille pas s'y engager, mais il est très important, vis-à-vis du public, de ne pas fausser les enjeux. Il convient de développer massivement, et le plus rapidement possible, les autres voies.

**Commentaires d'Edouard BREZIN  
Président de l'Académie des Sciences (2005-2006)  
Ancien Président du CNRS**

(...) Nous ne sommes plus dans la perspective du débat sur l'opportunité de ce choix, qui a été fait, il faut le rappeler, dans le cadre d'un consortium mondial auquel participait Euratom, au sein duquel la France n'est qu'une partie prenante. Les décisions ont été prises, et ce rapport a donc pour objet l'examen des problèmes à résoudre et l'explicitation des obstacles à franchir avant de pouvoir déclarer que cette technologie sera utilisable pour produire de l'énergie.

(...)

**Enfin, l'urgence des problèmes de changement climatique implique des mesures immédiates, alors que la fusion ne sera au mieux disponible que dans un terme lointain. Ces recherches ne peuvent donc servir « d'alibi environnement ».**

(...)

La machine du futur devra donc régénérer son tritium grâce aux réactions nucléaires produites par des neutrons venant irradier une couverture circulante contenant du lithium. Plusieurs types de couvertures circulantes sont à l'étude, beaucoup aux États-Unis, mais également en Europe avec des rôles qui vont d'un bouclier neutronique à la régénération. Dans une deuxième phase, que l'on peut situer vers 2015-2018 (cette date a été récemment repoussée à 2034 !), Iter devrait conduire des expériences où des modules contenant du lithium permettraient d'étudier cette régénération neutronique. (...)

## Mise à jour, janvier 2015

### **1. Argumentaire scientifique.**

Depuis la décision de la construction de la machine ITER, la science et la technologie de ces machines ont sensiblement progressé. ITER est une version de beaucoup plus grande dimensions, et utilisant des aimants supraconducteurs des deux tokamaks qui ont déjà été construits pour atteindre des régimes de fusion nucléaire. Il s'agit de TFTR aux USA avec le succès d'une production notable d'énergie de fusion D-T en 1994, et de JET en Europe produisant des réactions de fusion D-T en 1997.

Nous signalons dans ce document deux points technico-scientifiques particuliers qui ont nécessité, et qui nécessiteront encore, une évolution notable du design de cette machine sans précédent. Il s'agit d'une part de l'existence prévue d'événements transitoires violents qui risquent d'endommager la machine et de retarder le programme, et d'autre part de la manipulation de la puissance déposée au bord du plasma c'est à dire de la problématique de l'interaction plasma-matériaux. Nous signalerons également les incertitudes concernant la mise au point des cellules tritigènes destinées à fabriquer au sein même de la machine, par irradiation neutronique d'un composé du lithium, le « carburant » de la machine, de même que les grandes inquiétudes qui se sont fait jour sur la disponibilité dans vingt ans, au moment où commencera ce programme de recherche, de l'élément tritium pratiquement inexistant à l'état naturel sur Terre, et dont le stock à cette date sera considérablement amoindri.

Sur le premier point, la communauté des chercheurs de la science de l'interaction Plasma-Surface est confrontée dans le cas du projet ITER à des questions cruciales en matière d'interaction plasma-matériaux qui doivent être résolues dans les meilleures conditions. De nombreuses approches sont possibles pour résoudre certains problèmes scientifiques, mais il est clair que cette problématique a été largement sous-estimée il y a dix ans au moment du lancement du projet. Il est maintenant nécessaire de faire progresser la science et la technologie de l'interaction plasma-surface, d'améliorer la gestion technique de la puissance déposée au bord du plasma du tokamak par des innovations dans le domaine de l'ingénierie, de mettre au point une solution intégrée d'absorption de la puissance au bord du plasma compatible avec les régimes optimaux de plasma de forte densité énergétique et en régime de combustion nucléaire au cœur de la machine. Ces programmes sont en cours en particulier aux USA, qui

ont toujours été leaders dans les recherches en fusion nucléaire et qui disposent de plusieurs grandes machines permettant de réaliser ces études indispensables.

Ces recherches aboutiront, il faut l'espérer, à des solutions techniques qui devront nécessairement modifier le design de la machine ITER, et accroître encore de façon tout à fait certaine son coût de réalisation.

Sur le second point, il est bien connu que des événements transitoires tels que les disruptions et les modes de bord localisés peuvent avoir des effets délétères sur les plasmas de tokamak, avec la possibilité de causer des dommages aux composants face au plasma et aux premières structures de paroi, ainsi que de dégrader les performances du plasma. Bien que ces événements soient généralement tolérés dans les tokamaks actuels, il est prévu qu'ils auront des répercussions beaucoup plus graves sur ITER et dans les futurs dispositifs à fusion en régime thermonucléaire.

S'ils ne sont pas empêchés ou atténués, ces événements auront des impacts inacceptables sur la disponibilité opérationnelle de ces dispositifs et raccourciront la durée de vie des composants internes. Il est maintenant essentiel de développer les moyens de minimiser ces événements et leurs conséquences quand ils se produisent.

Dans la machine ITER, de nombreux défis scientifiques et technologiques restent aujourd'hui encore à relever pour démontrer que les plasmas de tokamak confinés magnétiquement avec des caractéristiques voulues pour une centrale de fusion peuvent être produits de façon fiable, prolongée et contrôlée sans effets délétères sur les matériaux et sur la structure du dispositif. Des recherches approfondies doivent être entreprises dans ce domaine pour répondre à ce défi que constitue l'objectif de stabilité, de fiabilité et de durabilité de la machine ITER. Une modification de l'ingénierie a d'ores et déjà été intégrée dans le programme de construction, avec l'ajout de nouvelles bobines magnétiques destinées à contrôler les instabilités attendues au bord du plasma (contrôle des Edge Localized Modes). Un surcoût est inévitablement associé à cette évolution technologique du projet, et la complexité globale de la machine s'en trouve encore accrue.

Enfin (last but not the least), un objectif essentiel d'ITER est la mise au point des cellules tritigènes. Un groupe de travail dédié à cet objectif spécifique sur ITER est en place depuis plusieurs années. On sait que les machines à fusion doivent fabriquer elle-même l'un des éléments de la réaction nucléaire (le tritium) en irradiant par des neutrons très énergétiques des composés d'un isotope du lithium et de plomb (fortement refroidis) afin de créer le tritium dans ces cellules, de l'extraire en permanence, de procéder à l'extérieur du tokamak à une séparation isotopique délicate, à stocker ce gaz hautement radioactif et

toxique, pour le ré-injecter de façon contrôlée dans la machine lors de son fonctionnement (ITER Tritium Plant).

Il faut noter par exemple que 56 kg de tritium par an seront nécessaires pour produire 1 GW thermique dans une centrale à fusion de type tokamak, ce tritium devant être produit dans le réacteur lui-même. Mais ce seront plusieurs tonnes de ce gaz radioactif qui auront circulé pendant un an dans ce petit réacteur électrogène de démonstration.

Pour préciser le principe, le plomb proposé dans les cellules tritigènes expérimentales est ici nécessaire pour multiplier les neutrons afin que globalement la production soit suffisante, compte-tenu des diverses pertes de neutrons de fusion qui sont estimées. Ce programme de conception des cellules tritigènes est en cours, les solutions techniques ne sont pas encore arrêtées. Mais il est tout à fait certain que l'estimation du budget associé à la réalisation et à la finalisation de ce programme de recherche portant sur quelques cellules tritigènes n'a pas encore été réalisée de façon précise étant donné le peu d'avancement du programme (ne pas oublier qu'une grande partie de la paroi interne du réacteur électrogène devra être couverte de ces centaines de cellules de production nucléaire).

En parallèle, pour réaliser ce programme de test des cellules tritigènes, il faudra avoir obtenu un plasma deutérium-tritium en régime de réaction nucléaire amorcé de façon stable et répétitive, en consommant nécessairement une quantité importante de ce gaz (y compris en prenant en compte le piègeage du tritium dans l'ensemble des matériaux constituant l'intérieur de la machine ITER). Lors des périodes de mise au point, plusieurs kilogrammes de tritium seront stockés dans « l'usine tritium » au voisinage du tokamak.

Le stock planétaire actuel de tritium peut être estimé à moins de vingt kilogrammes. Ce stock doit décroître à partir des dix prochaines années par suite d'une réduction de la production dans les centrales à fission installées au Canada.

Le planning de réalisation d'ITER défini en 2005 permettait juste de réaliser « à temps » le programme de recherche utilisant le tritium. Or il se trouve que ce gaz radioactif disparaît continuellement avec un taux de 5 % par an environ par désintégration radioactive naturelle.

C'est ce qui a conduit les meilleurs spécialistes aux USA (Princeton Plasma Physics Laboratory et Los Alamos National Laboratory) à définir ce qu'il est convenu de dénommer la « fenêtre tritium » pour les recherches en fusion dans la filière Deutérium-Tritium (the Tritium Window).

**En effet, ce programme de recherche à grande échelle en fusion nucléaire D-T a été défini en 2005 comme réalisable seulement à condition de ne pas consommer le stock de tritium avant le démarrage de ce programme, et de réaliser ce programme avant 2025 environ.**

Or il se trouve d'une part qu'un programme de recherche nouveau avec utilisation du tritium est programmé sur le tokamak européen JET prochainement, programme fort consommateur de tritium, et d'autre part que le retard déjà enregistré sur le programme ITER (on prévoit le début de la phase de recherche avec tritium en 2035) risque fort d'avoir pour conséquence une pénurie de tritium à cette date, et donc de rendre caduc à ce moment le programme ITER dans son ensemble.

Pour conclure, le programme ITER est un projet ambitieux et qui présente un grand intérêt comme projet de recherche appliquée dans le cadre de la recherche de nouvelles sources nucléaires d'énergie. Il souffre cependant aujourd'hui des conséquences d'une évaluation très insuffisante de sa complexité au moment du lancement de ce projet.

Les très grandes incertitudes scientifiques et techniques qui se sont fait jour et sont irréfutables, conduisent à la nécessité d'un soutien financier perpétuellement renouvelé. Le niveau de ces demandes de financement publics pour ces recherches est sans équivalent jusqu'à présent, en particulier auprès des collectivités locales et régionales.

**Il serait opportun maintenant de proposer aux administrateurs internationaux du projet de définir une stratégie de financement à court, à moyen et à long terme de ce projet international en présentant en particulier aux élus une information objective et sincère portant sur le projet dans son ensemble.**

## **2. Argumentaire technique et technologique rapide.**

« ITER Organization est chargée de réaliser l'intégration et l'assemblage des éléments livrés sur le site ITER par les sept membres du programme. Il s'agit notamment d'assembler le tokamak ITER, constitué de près d'un million d'éléments, et, en parallèle, d'installer les unités intégrées : chauffage à ondes radiofréquence, cycle du combustible, circuit de refroidissement et alimentation électrique.

Les éléments fournis par les membres internationaux d'ITER sous forme de contributions en nature seront assemblés sur le site selon des séquences prédéfinies. Les premiers composants fabriqués par les agences domestiques devraient être arrivés sur le site ITER en 2014. L'ordre et la chronologie des

étapes de montage entre cette date et la mise en service du tokamak ITER, en 2019, ont été planifiés avec soin dans le cadre d'un plan d'assemblage qui - pour la machine ITER - ne comporte pas moins de 40 000 lignes. Les opérations de montage nécessiteront 1,5 million d'heures de main-d'œuvre sur une période de quatre ans. » (ITER.org, 2015)

**OR :**

Assembler un puzzle d'un million de pièces différentes et souvent complexes, dont un grand nombre sont fabriquées hors de France, et doivent s'emboîter comme dans un puzzle, et alors que : (...) « Pour que la machine fonctionne de manière optimale, il est extrêmement important d'en aligner avec précision les éléments, en particulier le système magnétique et les composants internes » (...) (ib) », relève *a priori* mais raisonnablement, d'une impossibilité matérielle et technique.

Même si :

(...) « Les dimensions et le poids des principaux éléments, les tolérances infimes et les opérations très précises qu'implique le montage de ces systèmes particulièrement imposants ; la diversité des constructeurs et la planification rigoureuse du chantier sont autant d'éléments qui font d'ITER un défi technique et logistique sans équivalent. » (ib)

## **Conclusions du rapport**

*Il semble inévitable, en l'état du projet ITER au mois de janvier 2015, que sa poursuite va rapidement nécessiter d'importants ajustements financiers se chiffrant très vraisemblablement à plusieurs milliards d'euros.*

*Or, aucun des actuels partenaires, nationaux et internationaux, et notamment l'Europe, n'aura la volonté ni les moyens de poursuivre cette fuite en avant exponentielle du point de vue budgétaire.*

*A notre avis, ITER devrait être abandonné sous sa forme actuelle dès maintenant.*

*Cependant, vu les importants investissements réalisés, une solution raisonnable devrait être trouvée afin de conserver le mieux possible les dynamiques existantes en les mettant au service des recherches/développements sur les énergies renouvelables et/ou alternatives (solaire, géothermie, bio-masse, éolienne, hydraulique...)*

*Alain NICOLAS et Thiéry PIERRE, février 2015*

## ANNEXE

### Bref aperçu des potentiels de l'énergie solaire

Nous le savons tous, avec l'énergie solaire, l'humanité dispose d'un réservoir inépuisable d'énergie. En effet, en prélevant une part infime du rayonnement solaire, l'intégralité de la demande énergétique de la planète serait satisfaite. On rapporte souvent que le rayonnement solaire reçu par la Terre représente plus de 10 000 fois l'énergie consommée actuellement par la planète.

Le défi du 21ème siècle sera celui de la mise en œuvre de nouvelles techniques de conversion et de stockage de ce flux d'énergie solaire, et celui de la distribution large de cette ressource.

Partout sur la planète, y compris dans les pays en voie de développement, des centres de recherche scientifique et technique spécifiquement consacrés à l'énergie solaire voient le jour. Un grand nombre d'universités des pays développés disposent d'un centre de recherche sur l'énergie solaire et/ou sur les énergies renouvelables. De nombreux Etats des USA ont établi de tels centres.

En comparaison, la France est très en retrait dans cette dynamique internationale avec seulement l'INES, l'Institut National de l'Energie Solaire, fruit d'une coopération entre le CEA, le CNRS, l'Université de Savoie, la Région Rhône-Alpes et le Conseil Général de la Savoie (voir [www.ines-solaire.org](http://www.ines-solaire.org)) :

*« L'INES est le centre français de référence dans le domaine du solaire. Porté par le Conseil Général de la Savoie et la Région Rhône-Alpes avec les équipes du CEA, du CNRS, de l'Université de Savoie et du CSTB, il est situé à Savoie Technolac sur les rives du lac du Bourget. »*

Actuellement, nous raisonnons beaucoup trop en termes classiques et convenus lorsque ces techniques sont abordées. On mentionne par habitude les techniques thermiques pures (chauffage direct des bâtiments ou des fluides), les techniques plus industrielles associées au solaire thermodynamique consistant en une concentration du rayonnement et finalement en la production de puissance électrique par des alternateurs classiques. Et enfin, on mentionne le solaire photovoltaïque qui exploite la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en électricité par

l'intermédiaire de semi-conducteurs coûteux, solution certes pratique à petite échelle, mais peu efficace.

Au-delà des programmes engagés pour l'amélioration de chacune de ces filières, il est essentiel de favoriser une synergie des recherches allant des plus fondamentales dans diverses disciplines, par exemple dans le cas des semi-conducteurs et dans celui des convertisseurs à plasma, aux plus appliquées par exemple sur la technologie des concentrateurs solaires. Plusieurs disciplines physiques sont concernées : l'optique, la physique du solide, la physique des plasmas, la thermodynamique, et plusieurs domaines techniques doivent concourir dans ces projets.

A titre d'exemple, les récentes avancées dans le domaine des nouveaux convertisseurs thermo-ioniques à plasma, qui avaient été un espoir dans les années 1960 puis abandonnés pour des raisons techniques, et qui permettent selon les plus récentes recherches d'envisager à moyen terme des rendements de l'ordre de 60%, montrent que d'anciennes techniques peuvent être la source de développements modernes du plus grand intérêt si l'on associe les matériaux nouveaux issus de la recherche sur les semi-conducteurs à des techniques issues d'une autre discipline, en l'occurrence la physique des plasmas.

***D'une façon générale, l'objectif des recherches à mener porte sur la mise au point de systèmes allant du générateur compact de faible puissance aux grands champs de captation solaire, en ayant pour objectif de maximiser le rendement des convertisseurs en exploitant toute la gamme du spectre solaire allant de l'infrarouge à l'ultraviolet. Il est important de noter que, à l'heure actuelle, aucun dispositif-capteur ne remplit cette fonction de capteur à spectre énergétique large.***

En ce qui concerne les aspects économiques, les entreprises qui peuvent se développer dans ce domaine de la photonique énergétique solaire vont des PME qui réalisent essentiellement l'assemblage de composants, aux grandes entreprises qui peuvent développer de nouvelles techniques et de nouvelles filières de production d'énergie et qui ont la capacité d'exporter largement ces produits. Il s'agit donc d'une activité d'innovation scientifique et technique qui constitue une opportunité pour la croissance économique régionale.

***Une initiative récente en région, la Cité de Energies du CEA2 à Cadarache est à soutenir dans le cadre de ces projets. Il est cependant essentiel que tous les acteurs régionaux soient associés à ce type d'initiative, en particulier la Région PACA et les grands Etablissements de Recherche (CNRS, Universités).***

**Mais au-delà de cette première étape, il est souhaitable qu'un projet plus ambitieux et plus large de Centre International de Recherche sur l'Energie Solaire (CIRES) soit établi en PACA.** En effet, la dimension internationale est tout à fait essentielle dans ces recherches scientifiques et techniques qui sont d'ores et déjà très largement engagées à l'étranger.

Il serait particulièrement paradoxal que la région la plus ensoleillée de France soit la région la moins impliquée dans ces projets de développement de l'énergie solaire...