

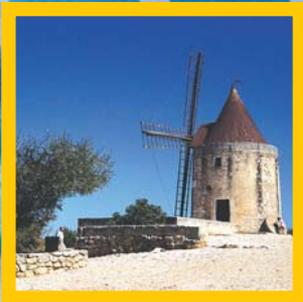


# iter

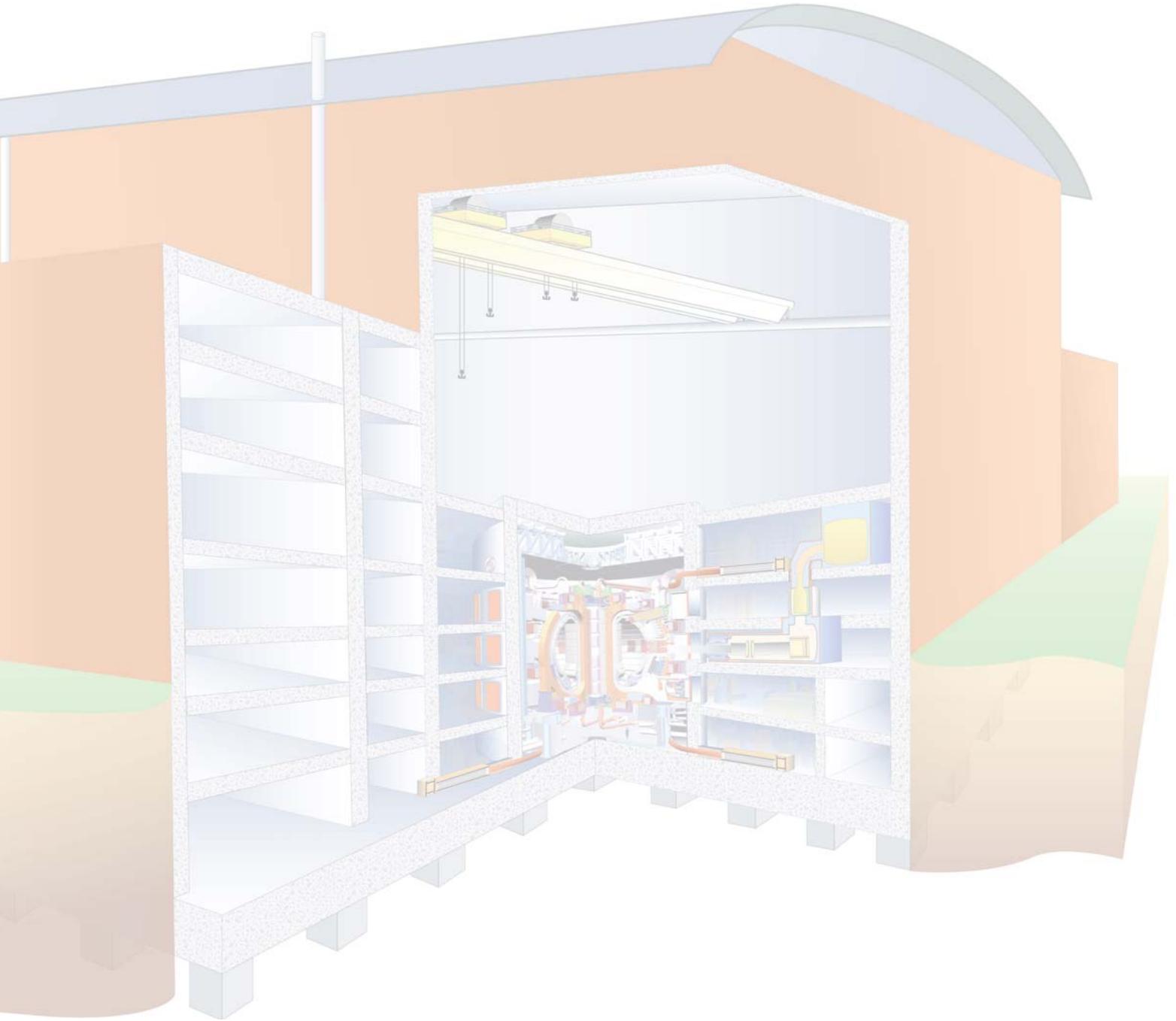
en Provence

Le dossier du débat public





**iter**  
en Provence



# S O M M A I R E

## 1<sup>ère</sup> partie : **iter** 5 à Cadarache

1. La finalité des recherches sur la fusion .....6
2. Un projet de recherche international .....7
3. Le projet ITER : son évolution, son organisation ..... 16
4. Cadarache, d'une candidature à une décision .....20
5. La description de l'installation ITER à Cadarache.....21
6. Le coût et financement du projet ITER.....27

## 2<sup>ème</sup> partie : **analyse des risques** 32 Impacts sanitaires et environnementaux du projet

1. Les aspects techniques et réglementaires du projet .....34
2. L'impact sur la santé et sur l'environnement .....44
3. La tenue au séisme .....48
4. L'impact sur le patrimoine, impacts visuels .....49
5. L'impact sur la faune et la flore .....51

## 3<sup>ème</sup> partie : **les enjeux du projet** 52 dans la région

1. L'aménagement du territoire.....54
2. Les enjeux économiques.....58
3. Les enjeux technologiques, scientifiques et en termes  
d'enseignement et de formation .....60

## 4<sup>ème</sup> partie : **après** 62 le débat public

- ANNEXES ..... 65
- GLOSSAIRE .....70

Pour les astérisques signalés par une étoile dans le texte (\*)  
veuillez consulter le glossaire en fin de document



## ITER À CADARACHE

<b>La finalité des recherches sur la fusion .....</b>	<b>6</b>
<b>Un projet de recherche international.....</b>	<b>7</b>
Une composante majeure du programme de recherche fusion .....	8
La réaction au cœur de la machine ITER : la fusion nucléaire .....	12
Les principaux dispositifs d'ITER et leur fonction ..	14
<b>Son évolution, son organisation .....</b>	<b>16</b>
Un peu d'histoire .....	16
L'organisation d'ITER .....	17
<b>Cadarache, d'une candidature à une décision .....</b>	<b>20</b>
<b>Description de l'installation ITER à Cadarache .....</b>	<b>21</b>
La localisation .....	21
Les bâtiments de l'installation ITER .....	21
Les alimentations en électricité et en eau .....	21
Le chantier.....	24
<b>Coût et financement .....</b>	<b>27</b>
L'introduction : coût global du projet ITER .....	27
Le coût et financement de la construction.....	28
Le coût et financement de l'exploitation .....	30
Le coût et financement du démantèlement .....	30

Le contexte énergétique mondial est caractérisé par des besoins croissants, une raréfaction des ressources et une prise de conscience de plus en plus partagée des risques environnementaux et climatiques associés à leur utilisation intensive. Le projet international ITER ("le chemin" en latin) représente une étape clé pour la mise au point d'une nouvelle source d'énergie : l'énergie de fusion.

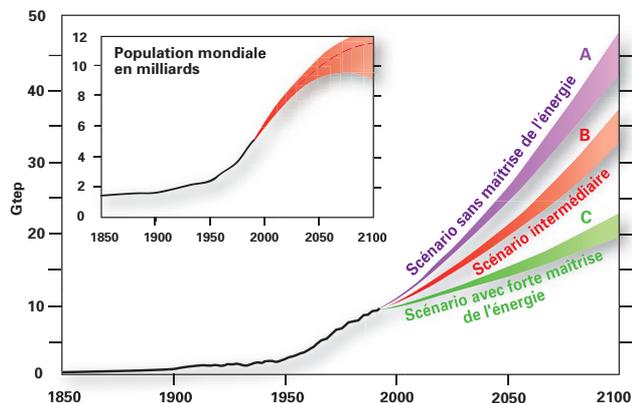
L'énergie de fusion est produite par les réactions qui, depuis des milliards d'années, permettent au Soleil et aux étoiles, de dispenser lumière et chaleur. Dans les environnements extrêmement chauds et denses, comme au cœur du Soleil, la matière atteint des températures et des densités très élevées permettant aux atomes d'hydrogène de fusionner et ainsi de libérer une énergie importante. Cette réaction de fusion se produit dans un plasma\*, le quatrième état de la matière avec les solides, les liquides et les gaz. La force gravitationnelle permet au Soleil de maintenir ces réactions de fusion en son centre à une température proche de 20 millions de degrés.

Ce sont des scientifiques russes qui ont été les premiers à produire un plasma d'une dizaine de millions de degrés dans un réacteur de recherche appelé tokamak<sup>1</sup> en 1968. Depuis, les équipes de recherche européennes et internationales ont permis de valider différents paramètres. Avec Tore Supra à Cadarache, elles ont prouvé que l'on pouvait contrôler un plasma pendant des temps records (plus de six minutes). Avec le JET à Culham (en Grande Bretagne), elles ont obtenu des réactions de fusion d'une puissance de 16 MW. Et avec le JT 60 au Japon, elles ont battu des records de température du plasma (plus de 200 millions de degrés).

S'inscrivant dans l'histoire des recherches sur la fusion, ITER succèdera à une longue lignée de machines ayant atteint, chacune indépendamment, l'une des conditions requises pour obtenir un plasma en combustion : densité, température et durée de confinement. ITER sera la première installation qui réunira simultanément toutes ces conditions. Ses performances permettront d'obtenir suffisamment de réactions de fusion pour produire de l'hélium à haute température qui participera d'une manière significative au chauffage interne du plasma.

En parallèle, d'autres recherches seront nécessaires pour disposer de toutes les briques du futur réacteur produisant de l'électricité notamment la mise au point et la caractérisation de matériaux de structure, puis l'intégration de l'ensemble des éléments dans un démonstrateur préindustriel (DEMO).

<sup>1</sup> Acronyme russe de *Toroidalnaya Kamera c Magnitnymi Katushkami* : machine avec des bobines magnétiques en forme de tore, une sorte de "chambre à air" magnétique.



Source :  
Congrès mondial  
de l'énergie

## Finalité des recherches sur la fusion

La consommation totale d'énergie dans le monde pourrait être deux à cinq fois plus importante en 2100. Toutes les projections économiques montrent que les besoins énergétiques vont continuer à augmenter, même si des économies d'énergie sont mises en œuvre dans les pays développés.

### Des besoins en énergie croissants

Cette augmentation des besoins énergétiques, dont l'amplitude varie selon le type de scénario retenu (niveau de croissance économique, prise en compte ou non des aspects environnementaux...) a deux causes principales :

- l'augmentation de la population mondiale qui pourrait atteindre 9 milliards en 2050 contre 6,4 milliards aujourd'hui.
- l'augmentation des besoins énergétiques des pays en fort développement.

Suivant les scénarios de besoins énergétiques retenus (voir figure), la consommation totale d'énergie dans le monde, de l'ordre de 10 milliards de tonnes équivalent pétrole (10 Gtep) par an aujourd'hui, pourrait être, en 2100, deux à cinq fois plus importante.

### Des réserves en énergies fossiles en baisse

Aujourd'hui, 87% de l'énergie mondiale provient des ressources d'énergie fossiles non renouvelables. En prenant en compte les niveaux de consommation actuels, les réserves prouvées<sup>2</sup> sont évaluées à 43 ans pour le pétrole, à 66 ans pour le gaz et 240 ans pour le charbon.

Les ressources en uranium connues aujourd'hui et raisonnablement accessibles, sont, quant à elles, de 50 à 75 ans sur la base de la consommation actuelle avec les centrales actuellement en fonctionnement<sup>3</sup>. L'utilisation de nouveaux réacteurs nucléaires de fission, dits de quatrième génération, devrait permettre une utilisation optimisée de l'uranium et ainsi une production d'énergie sur plusieurs dizaines de siècles.

Au problème de la diminution des ressources énergétiques s'ajoute la nécessité de lutter contre l'effet de serre, responsable du réchauffement climatique, et donc de limiter le recours aux énergies fossiles fortes productrices de gaz à effet de serre.

En France, le projet de loi d'orientation sur l'énergie, adopté en première lecture par l'assemblée nationale le 1<sup>er</sup> juin 2004, fixe plusieurs objectifs principaux dans la perspective de l'élaboration du "bouquet énergétique" du futur : contribuer à l'indépendance énergétique nationale, mieux préserver l'environnement en particulier grâce aux énergies non génératrices de gaz à effet de serre, garantir un prix compétitif de l'énergie et son accès à tous.

Les recherches sur la fusion, dont le projet international ITER représente une étape clé sur le chemin d'une nouvelle source d'énergie, s'inscrivent dans ce contexte.

Aujourd'hui 1,6 milliard d'individus n'ont toujours pas accès à l'électricité ; ils seront encore 1,4 milliard en 2030 soit 17% de la population mondiale (source AIEA).



<sup>2</sup> A noter que ces durées de vie peuvent probablement être rallongées du fait des progrès réalisés dans l'exploitation de ces ressources.  
<sup>3</sup> Comme pour les autres combustibles ces durées de vie peuvent probablement être rallongées du fait des progrès réalisés dans l'exploration de ces ressources.

# Le projet ITER : un projet de recherche international

L'état des recherches effectuées en Europe, sous l'égide d'Euratom\*, avec entre autres les installations Tore Supra et JET, ainsi que dans le monde avec l'installation JT 60 au Japon et l'installation TFTR aux USA en particulier, permet d'envisager la construction d'une nouvelle machine expérimentale intégrant la plupart des technologies nécessaires à l'échelle d'un futur réacteur à fusion produisant de l'électricité.

Les recherches effectuées jusqu'alors ont été essentielles dans le développement de l'énergie de fusion nucléaire. Elles ont permis :

- de progresser dans la connaissance et le diagnostic (systèmes de mesures) de la physique des plasmas,
- de faire progresser les performances globales des plasmas grâce aux expériences effectuées avec les installations de recherche existantes dans le monde dont le JET et le TFTR,
- de concevoir et fabriquer des composants spécifiques (bobines supraconductrices\*, matériaux capables de résister à des hauts flux thermiques\*, systèmes de chauffage du plasma...),
- de développer des matériaux à faible activation\* et d'étudier leur comportement.

S'appuyant sur les résultats acquis, le passage à une nouvelle étape expérimentale est considéré comme opportun depuis les années 90. D'où le projet international ITER qui rassemble aujourd'hui l'Union européenne, la Fédération de Russie, le Japon, les Etats-Unis, la Chine et la République de Corée auxquels s'est joint l'Inde en décembre 2005.

En faisant la démonstration technique et scientifique qu'il est possible de générer un plasma produisant une puissance de fusion de l'ordre de 500 MW à partir d'une puissance de 50 MW, soit une puissance dix fois supérieure à celle qui aura été injectée, ITER permettra d'aller plus loin dans la validation de la fusion comme l'une des options d'un "bouquet énergétique" du futur. Le déroulement du projet comporte deux phases essentielles :

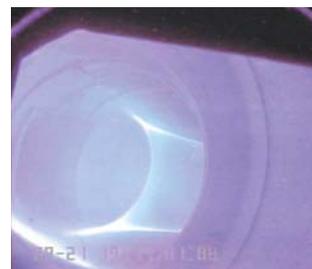
- Environ 10 ans pour la construction de la "machine" et des infrastructures associées,
- Environ 20 ans d'exploitation scientifique, de recherches, de développements technologiques, de validations expérimentales.

A l'issue de la décision de cessation définitive d'exploitation\*, la phase de démantèlement (y compris la phase d'assainissement) est envisagée sur 15/20 ans.

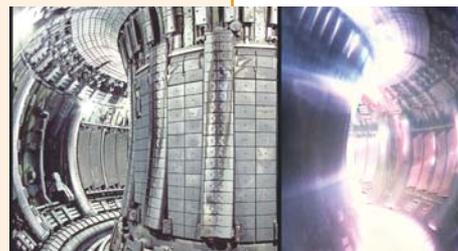
## Sur le chemin du réacteur industriel

**Le JET, à Culham,** est un tokamak destiné à étudier les plasmas de fusion à base d'un mélange de deutérium et tritium : le deutérium est présent à l'état naturel dans l'eau (33 g/m<sup>3</sup>) et le tritium peut être produit à partir du lithium, élément présent dans les roches et l'eau de mer (2 grammes par tonne dans la croûte terrestre et 0,18 g par m<sup>3</sup> dans les océans). Le JET détient le record de la puissance de fusion produite avec 16 Mégawatts (16 MW) pendant une impulsion d'environ une seconde.

**Tore Supra, à Cadarache,** est un tokamak destiné à l'étude des plasmas en régime quasi permanent. Contrairement à JET et ITER, Tore Supra qui fonctionne avec de l'hydrogène et du deutérium, n'utilise pas de tritium : c'est pour cette raison que Tore Supra ne produit pas de puissance de fusion. En revanche il détient le record d'énergie extraite d'un plasma, avec 1000 MJ pendant des durées atteignant près de 6 minutes 30 secondes en décembre 2003. Des performances qu'il doit en particulier à ses bobines supraconductrices qui peuvent fonctionner en permanence et à des composants, développés spécialement, qui résistent à de très hauts flux thermiques et préfigurent ceux dont ITER sera équipé.



Plasma à l'intérieur de Tore Supra



\* Il reste à éprouver la longévité de ces matériaux en situation réelle. C'est le sens du programme expérimental qui est prévu en complément d'ITER visant à disposer, à terme, d'un équipement de recherche dédié aux études des matériaux soumis à de haut flux de neutrons\*.

## Une composante majeure du programme de recherche fusion

Le projet ITER est l'une des composantes majeures du programme de recherche fusion avec les études sur les matériaux et le projet de développement d'un démonstrateur pré-industriel (DEMO). Il contribue à structurer les recherches scientifiques et technologiques qui se développent dans un cadre international.

Les recherches sur la fusion se caractérisent par une multidisciplinarité allant de la physique des plasmas (recherche fondamentale) jusqu'aux technologies les plus avancées (objectifs technologiques).

### Objectifs scientifiques

#### La physique des plasmas

ITER permettra d'étudier la physique des plasmas. Les résultats obtenus dans ce domaine occuperont une place centrale dans le dimensionnement des installations envisagées après ITER.

Les premières années seront consacrées à l'établissement des principaux paramètres physiques de fonctionnement avec un plasma d'hydrogène et de deutérium. Ensuite, ITER permettra d'étudier un plasma de deutérium et tritium (deux isotopes\* de l'hydrogène) dans l'objectif de :

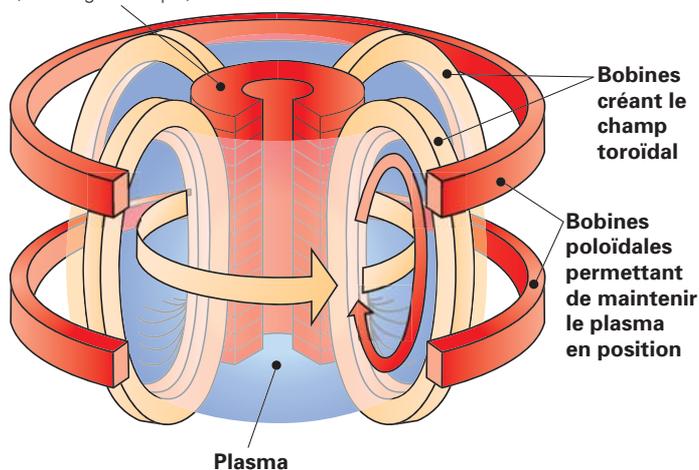
- démontrer scientifiquement et techniquement qu'il est possible de générer un plasma produisant une puissance dix fois supérieure à celle qui lui aura été fournie. Avec ITER, l'objectif est de générer une puissance de fusion de 500 Mégawatts (MW) en injectant 50 durant plus de 6 minutes, soit un coefficient d'amplification de la puissance égal à 10. A titre de comparaison, le JET est parvenu à un record de puissance de fusion de 16 MW avec 25 MW injectés, soit un coefficient d'amplification de la puissance de 0,64.
- démontrer que les réactions de fusion dans le plasma peuvent être maintenues en permanence avec une puissance de fusion réduite.



La physique des plasmas exige la description d'un grand nombre de phénomènes physiques qui couvre des processus de physique atomique et de physique des matériaux. L'objectif de ces études de modélisation est de concevoir un "simulateur" permettant d'interpréter les expériences, de les préparer et de permettre le dimensionnement physique des futures installations.

## Principes d'un tokamak

**Bobine poloïdale créant la décharge électrique**  
(chauffage ohmique)



ITER sera un tokamak. C'est avec cette machine que le principe de l'énergie de fusion par confinement magnétique a été mis au point. Le principe de base pour créer du plasma dans un tokamak consiste à introduire un mélange gazeux et à le chauffer à plus de 100 millions de degrés. Des bobines supraconductrices (bobines poloïdales\* et toroïdales\*) créent les champs magnétiques qui permettent de maintenir le plasma à distance des parois de la machine.

Dans la perspective du dimensionnement et de l'optimisation d'un réacteur pré-industriel (projet DEMO), après ITER, la puissance de calcul des supercalculateurs devrait être augmentée pour modéliser des phénomènes complexes comme les instabilités se produisant à l'intérieur d'un plasma. Pour cela, les puissances de calcul devraient aller de la centaine de Tflops par seconde (1 Tflop = mille milliards d'opérations) à 1000 voire 10 000 Tflops. De tels développements requièrent des experts de haut niveau maîtrisant à la fois des métho-

des numériques avancées et une connaissance approfondie de la physique des plasmas. Une activité qui devrait susciter l'intérêt de chercheurs universitaires et du CNRS leur permettant ainsi d'être intégrés dans les recherches les plus en amont de la fusion.

### Objectifs technologiques

Les objectifs technologiques d'ITER sont de tester des concepts pour les futurs réacteurs de fusion produisant de l'électricité, ce qui suppose le développement de composants spécifiques, de matériaux, de robots...

### L'ingénierie des plasmas

L'ingénierie des plasmas concerne l'ensemble des systèmes et composants nécessaires pour contrôler un plasma et maintenir sa combustion

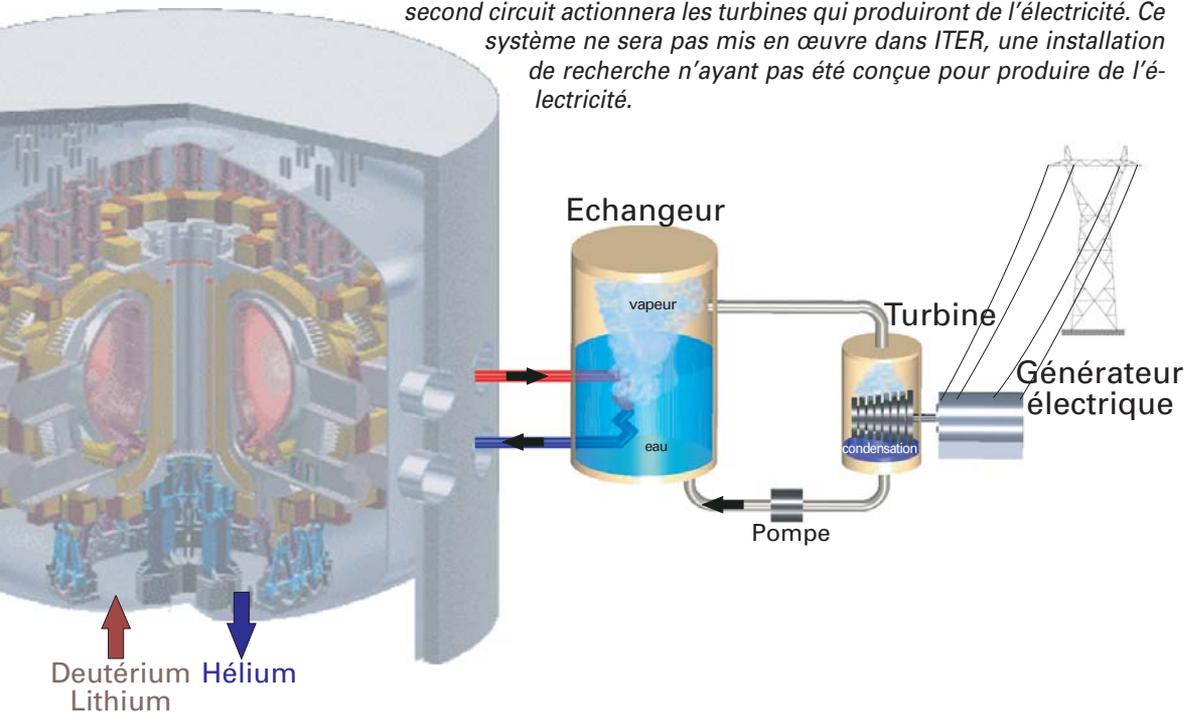
en état stationnaire. Les recherches sur les composants qui forment la première surface matérielle au contact du plasma sont à la frontière entre technologie et physique. Leur développement constitue l'un des défis majeurs pour ITER, puis pour le développement du réacteur produisant de l'électricité.

Ces composants subissent des contraintes thermiques, mécaniques et neutroniques sévères. Actuellement, ceux qui sont mis au point résistent à des températures très élevées et à de très hauts flux thermiques pouvant atteindre jusqu'à 20 MW/m<sup>2</sup> : ce sont des matériaux composites à base de carbone et de cuivre. Ceux qui équipent la première paroi d'ITER ont été testés avec succès dans Tore Supra à Cadarache. Pour ITER, le défi sera double : réaliser des centaines de composants de façon industrielle et répondre à



## Après ITER ?

Après ITER, qui représente une étape clé dans un programme s'étendant sur plusieurs décennies, un prototype industriel (DEMO) produisant de l'électricité devrait être construit à l'horizon 2040 pour démontrer que l'énergie de fusion produite pourra être transformée en électricité dans des conditions industrielles et économiques satisfaisantes. L'un des objectifs technologiques du prototype DEMO consistera notamment à valider le principe de production de tritium, à partir d'éléments en lithium, à l'intérieur de la machine. DEMO utilisera aussi des matériaux capables de résister à des flux de neutrons\* de haute énergie. Il servira également à tester l'efficacité technique et économique du système de production de l'électricité qui consiste à transmettre l'énergie libérée par les réactions de fusion à un circuit de refroidissement (eau sous pression, hélium...). La chaleur ainsi transportée vers un échangeur est alors cédée à un second circuit. Transformée en vapeur d'eau, l'eau de ce second circuit actionnera les turbines qui produiront de l'électricité. Ce système ne sera pas mis en œuvre dans ITER, une installation de recherche n'ayant pas été conçue pour produire de l'électricité.

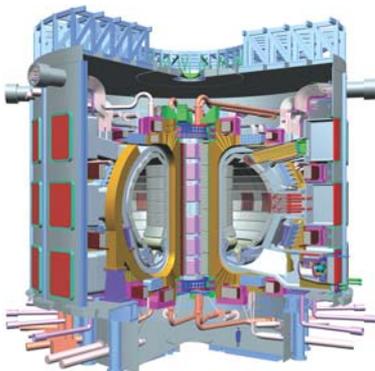


## Principales phases du programme ITER

Les dix premières années d'exploitation seront essentiellement consacrées à la montée en performance d'ITER avec plusieurs phases :

- phase de tests de fonctionnement (environ 3 ans) : cette phase devrait permettre la mise au point de l'installation sur les aspects techniques et physiques.
- mise au point des paramètres de fonctionnement (environ 1 an) : la maintenance robotisée sera nécessaire à partir de cette phase.
- phase de montée progressive des performances technologiques (environ 6 ans) : expérimentations avec un plasma formé de deutérium et tritium avec comme objectif final de générer une puissance de 500 MW durant plus de six minutes à partir d'une puissance de 50 MW ; premiers tests de matériaux et de composants dans la perspective du développement du démonstrateur pré-industriel DEMO...

Les dix années suivantes seront consacrées aux expérimentations visant la réalisation de tests technologiques d'endurance sous flux neutronique. Le programme détaillé sera établi en fonction des résultats obtenus à l'issue de la première phase expérimentale. Il sera régulièrement réajusté ensuite.



toutes les configurations expérimentales choisies. Dans l'optique du réacteur pré-industriel DEMO, il faudra satisfaire, de surcroît, des objectifs de durée de vie, de fiabilité, de sûreté mais aussi des critères économiques.

Un autre volet des études concerne le domaine des systèmes de diagnostics, de mesures et de régulation (température, densité, pression...) qui se développera, dans le cadre d'ITER, dans la prochaine décennie. Ces systèmes sont utilisés pour comprendre les phénomènes intervenant

dans la formation des plasmas et mesurer leurs grandeurs physiques et, en fonction des paramètres obtenus, de rétroagir sur les plasmas pour maintenir leurs performances à un niveau optimal.

### Le système de confinement magnétique

Les bobines supraconductrices\* servent

à générer les champs magnétiques qui permettent de maintenir un plasma à distance des parois de la machine. Elles constituent la pierre angulaire d'ITER : de la validité des choix technologiques effectués et de la qualité de sa réalisation dépendent le succès et la durée de vie des expériences. Si la technologie utilisée pour ITER paraît adaptable ou transposable pour DEMO, les recherches devraient être poursuivies pour une simplification du système et la mise au point de nouveaux matériaux. La difficulté essentielle reste la mise en forme de ces matériaux supraconducteurs (matériaux qui n'offrent aucune résistance électrique).

### Les matériaux de structure

Certains composants internes dans ITER permettront de réaliser des expérimentations de production de tritium à l'intérieur de la machine, étape nécessaire dans la perspective d'un réacteur à fusion produisant de l'électricité.

Des études de modélisation ont permis de démontrer la faisabilité de ce type de composants depuis les années 1990. Les activités de recherche et développement se sont ensuite concentrées sur un nombre limité de concepts et se sont enrichies d'un volet expérimental. Le programme européen est actuellement centré sur la réalisation des deux concepts qui seront installés dans ITER pour valider les grandes options technologiques retenues : le concept "Helium Cooled Lithium Lead" utilisant le lithium-plomb liquide et le concept "Helium Cooled Pebble Bed" utilisant des lits de billes de céramique contenant du lithium. Ces deux concepts sont basés sur l'utilisation de l'hélium comme caloporteur (fluide utilisé pour extraire la chaleur produite par les réactions de fusion) et d'un acier spécial Eurofer comme matériau de structure.

L'enjeu à plus long terme est de disposer des technologies nécessaires à la réalisation d'une couverture complète, composant essentiel du futur réacteur à fusion produisant de l'électricité. Les recherches sur les matériaux représentent un défi technologique pour la réalisation de réacteurs industriels de fusion. Leur qualification dans des conditions représentatives de fonctionnement d'un futur réacteur à fusion produisant de l'électricité est par conséquent un enjeu majeur du développement de la fusion. Ceci nécessite :

- le développement d'un programme de modélisation et des outils expérimentaux de simulation associés.
- la construction d'un équipement de recherche dédié aux études des matériaux soumis à

Le développement de composants spécifiques avec le concours d'industriels, comme ces éléments en composite de carbone dont est équipé Tore-Supra, capables de résister à de haut flux thermiques, a débouché sur des applications pour les freins et embrayages utilisés dans l'aviation, les chemins de fer, l'automobile...



de hauts flux de neutrons\* pour leur qualification. C'est le sens du projet IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) qui pourrait être développé en complément d'ITER dans un cadre international.

- des études liées à l'élaboration des composants (assemblage, soudage, mise en forme...) voire du matériau lui-même (les concepts avancés des futurs réacteurs à fusion utilisent par exemple des composites dont les propriétés thermomécaniques demandent des améliorations constantes).

### La robotique

Actuellement, la robotique n'est pas utilisée à grande échelle dans les installations de recherche existantes à l'exception du JET. L'un des défis d'ITER consistera à devoir se passer de l'intervention humaine à l'intérieur de la machine lorsqu'elle fonctionnera avec du tritium. Pour cela plusieurs projets sont à l'étude dans le cadre de coopérations développées avec des industriels. Pour leur développement, plusieurs contraintes doivent être prises en compte : celles d'un environnement nucléaire et celles plus spécifiques à la fusion, comme des trajectoires complexes, des composants de masse importante à manipuler avec une grande précision dans des espaces réduits, la nécessité de fonctionner à des températures élevées et en présence d'un champ magnétique intense...

Certains développements actuellement effectués en laboratoire portent sur l'adaptation d'un bras télémanipulateur de 30 à 40 cm équipé de pinces à ses extrémités. Dans ITER, il sera dédié aux opérations de découpe, soudage, boulonnage de composants majeurs, comme les cassettes du divertor\*... Parallèlement, les ingénieurs



travaillent à la mise au point de robots d'inspection capables de travailler dans des conditions de vide et de température sévères. Les robots prendraient la forme d'un bras articulé à cinq segments capable de se déployer et de se faufiler à l'intérieur de la machine.

Six robots de ce type seraient nécessaires dans ITER pour inspecter la totalité des éléments internes de la première paroi de la machine, prélever des échantillons ou encore aspirer des particules de poussière. Dans le cadre des études de qualification, un prototype de démonstration est en cours d'élaboration pour être opérationnel sur Tore Supra début 2007.

Le troisième type de systèmes robotisés concerne l'installation et la maintenance des modules de couverture de l'enceinte du plasma. Les pistes explorées visent à réaliser un rail circulaire de 360° qui se déploierait à l'intérieur de la machine. Un chariot satellite, équipé d'un bras télescopique et circulant sur ce rail, devra être capable d'aller chercher l'un ou l'autre des modules.



*Intervention d'un robot dans le JET. L'un des défis d'ITER consiste à devoir se passer de l'intervention humaine à l'intérieur de la machine. Plusieurs robots sont en cours de développement pour des opérations diverses.*

### Accès aux résultats scientifiques

*Le principe du partage des résultats scientifiques reste à établir précisément dans le cadre des négociations internationales. Un point précis pourrait être fait au cours du débat en fonction de l'avancée des négociations internationales. En ce qui concerne les aspects technologiques, tout ce qui sera développé spécifiquement pour le projet ITER sera accessible à l'ensemble des partenaires. En revanche, ce qui a déjà été développé par un partenaire dans le cadre de programmes antérieurs restera sa propriété.*

## La réaction au cœur de la machine ITER : la fusion nucléaire

Deux grands types de réactions nucléaires produisant de l'énergie sont possibles :

- la **fission** de noyaux d'atomes, comme l'uranium, en plusieurs atomes plus légers. C'est la réaction mise en œuvre dans les centrales nucléaires actuellement en fonctionnement pour produire de l'électricité.
- la **fusion** de deux noyaux d'atomes légers (par exemple le deutérium et le tritium, deux isotopes\* de l'hydrogène) pour donner naissance à un noyau d'un atome plus lourd. C'est cette dernière réaction qui sera mise en œuvre dans la machine ITER.

### Principes de la fusion

Pour obtenir une réaction de fusion, il faut réussir à rapprocher suffisamment deux noyaux alors qu'étant tout deux chargés positivement ils ont une tendance naturelle à se repousser. Pour y parvenir, il faut porter et maintenir ces noyaux à des températures qui dépassent la centaine de millions de degrés. A ces températures, les atomes sont ionisés\* et constituent ce qu'on appelle un **plasma\***.

Ce type de réaction de fusion se produit naturellement et abondamment dans les étoiles : une étoile commence à briller quand la matière

en son sein atteint, sous l'effet des forces de gravitation (force de la pesanteur), certaines conditions de densité et de température pour déclencher des réactions de fusion libérant alors de grandes quantités d'énergie. Alors que, dans une étoile, la tendance du plasma à se disperser et à se refroidir est contrebalancée par la gravitation, sur terre, les forces de gravitation sont insuffisantes et la réaction dans ces conditions est impossible. Il n'est pas envisageable non plus de confiner un plasma de ce type à l'aide de parois matérielles. Aucun matériau ne résisterait à des températures de dizaines de millions de degrés.

Une solution consiste à maintenir le plasma dans une "boîte immatérielle" créée par des champs magnétiques, on parle ainsi de confinement magnétique. Le concept le plus développé, dans la voie du confinement magnétique est celui du tokamak. L'ensemble des tokamaks construits dans le monde a permis de progresser continuellement sur les performances de la combinaison des trois paramètres :

- la **température** : comme cela a été vu, une température d'une centaine de millions de degrés est nécessaire,
- le **temps de confinement** de l'énergie : capacité du plasma qui a été chauffé à conserver sa chaleur,
- la **densité du milieu** : les réactions de fusion peuvent se produire dans un milieu de faible densité.

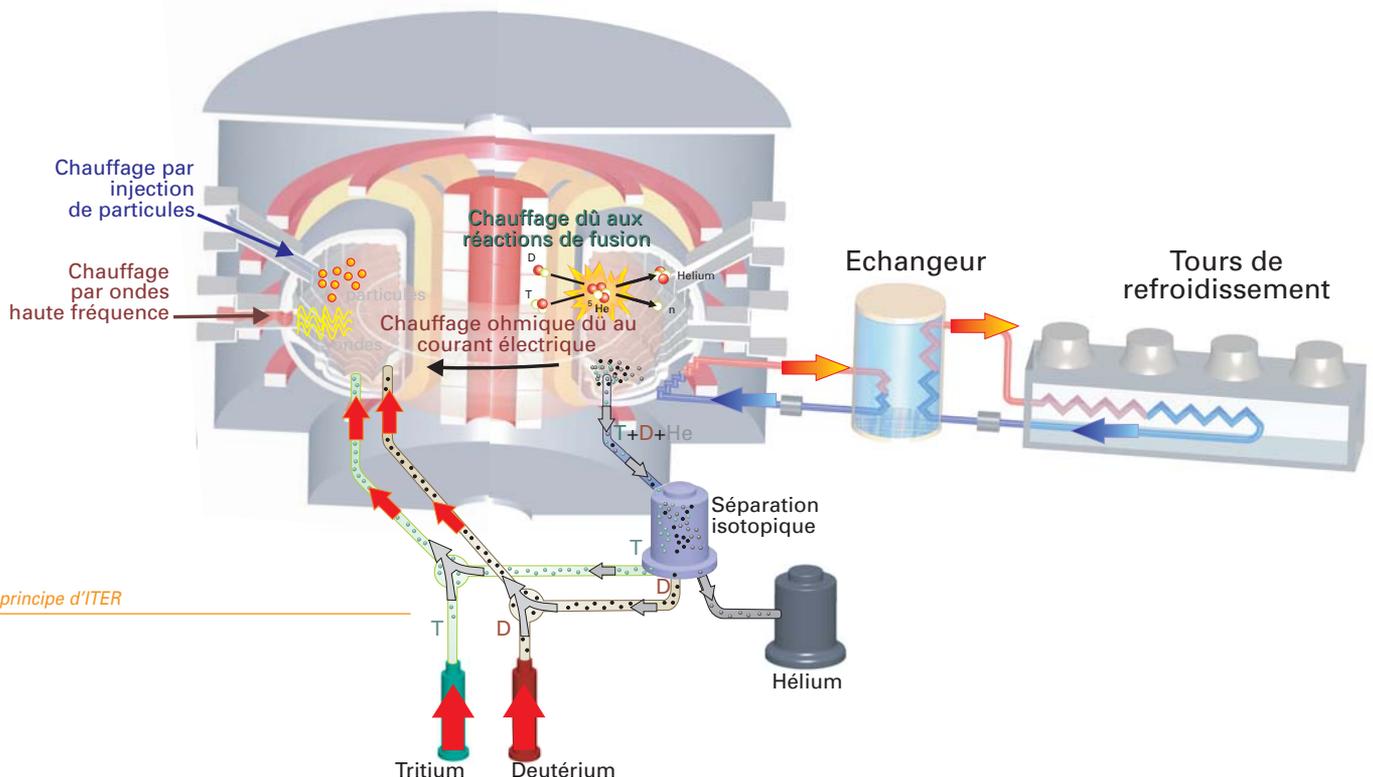


Schéma de principe d'ITER

Pour qu'une machine de fusion produise plus d'énergie qu'elle n'en consomme, il faut que ces trois paramètres dépassent simultanément un certain seuil de performance\*. Dans le cas de la fusion magnétique, les efforts portent sur les paramètres température et temps de confinement.

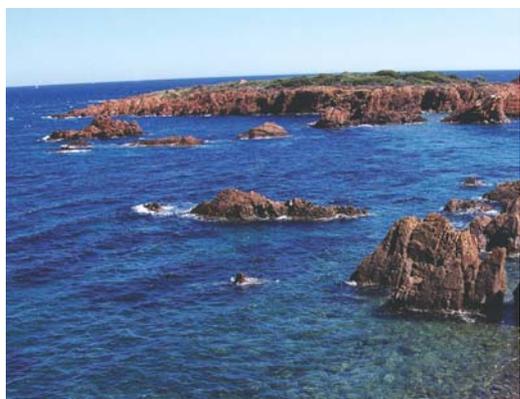
### Réaction de fusion mise en œuvre dans ITER

La réaction de fusion qui sera mise en œuvre dans ITER est la réaction entre deutérium et tritium, deux isotopes\* de l'hydrogène :



Cette réaction est celle utilisée dans le JET et TFTR. L'expérience acquise dans ce domaine est largement mise à profit pour préparer le fonctionnement d'ITER.

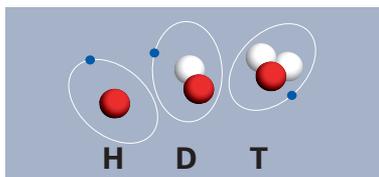
La fusion d'un noyau de deutérium avec un noyau de tritium produit un noyau d'hélium et un neutron et libère une grande quantité d'énergie. L'hélium qui porte environ 20% de l'énergie reste confiné, par les champs magnétiques, dans la chambre à vide, et contribue à entretenir la température du plasma. Le neutron qui porte environ 80% de l'énergie pénètre dans les parois de la chambre à vide où il est freiné et cède son énergie à un circuit d'eau de refroidissement. C'est ce dernier principe qui, dans les futurs réacteurs à fusion, servira à produire la vapeur qui entraînera les turbines pour produire de l'électricité.



### Le combustible d'ITER

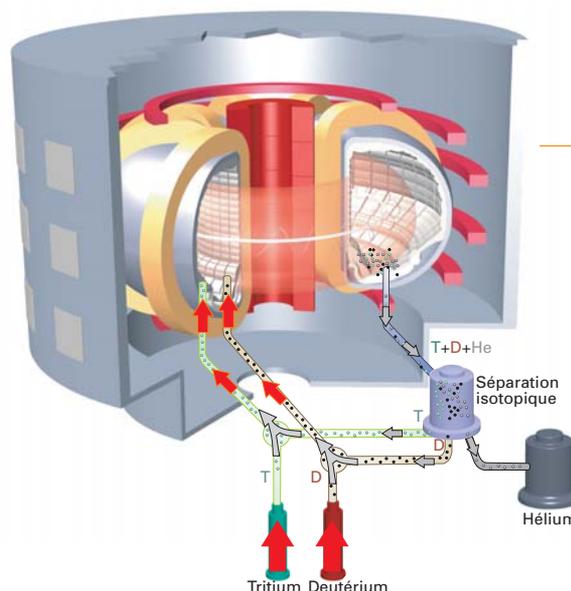
Le combustible d'ITER sera un mélange de deutérium et de tritium, deux isotopes de l'hydrogène : leur noyau, autour duquel gravite un électron, possède un proton.

Le deutérium et le tritium diffèrent par le nombre de neutrons, autre constituant du noyau avec le proton : le noyau d'hydrogène ne



contient pas de neutron, celui du deutérium en contient un et celui du tritium en contient deux. Le deutérium (D) et le tritium (T), comme l'hydrogène (H), ont les mêmes propriétés chimiques. Cependant, la différence de masse de leur noyau fait que leurs propriétés physiques se différencient : en particulier le tritium est radioactif, du fait de la constitution de son noyau : il se transforme naturellement en hélium en émettant un électron avec une période\* radioactive de 12,3 ans. Le deutérium est présent naturellement dans l'environnement : l'eau contient 1 atome de deutérium pour 6000 atomes d'hydrogène, soit 30 mg/l. Il n'est pas radioactif. Sa production repose sur des procédés de filtration (par séparation isotopique) qui permettent de séparer l'hydrogène et le deutérium contenus dans l'eau.

Le tritium n'est présent naturellement dans l'environnement qu'à l'état de traces (un atome de tritium pour  $10^{17}$  atomes d'hydrogène) ; il peut être produit à partir du lithium, élément présent dans les roches et l'eau de mer (2 g par tonne dans la croûte terrestre et 0,18 g par  $m^3$  dans les océans). L'approvisionnement en tritium de l'installation ITER pourrait être assuré, par exemple, selon les modalités déjà mises en place aujourd'hui en Europe pour les besoins du JET en Angleterre. Le tritium utilisé dans le JET provient du Canada qui dispose de réacteurs à eau lourde de type CANDU dont le fonctionnement produit du tritium.



Système de gestion du combustible

## Principaux dispositifs d'ITER et leur fonction

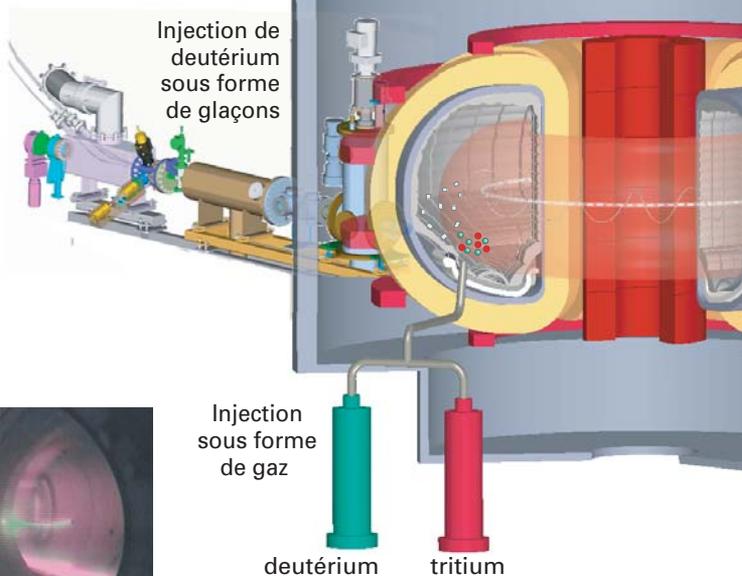
Le principe de base pour créer du plasma dans un tokamak consiste à introduire un mélange gazeux dans une chambre à vide et à le chauffer à plus de 100 millions de degrés. Le plasma créé est confiné à l'intérieur de la machine par des champs magnétiques. Ce sont ces principes maîtrisés qui seront mis en œuvre dans ITER.

### Injection du combustible

Le combustible (mélange de tritium et de deutérium) sera introduit sous forme gazeuse dans la chambre à vide d'ITER au début de chaque expérience par un système d'injection programmé. Une fois le plasma chaud, du combustible sera ajouté sous forme de "glaçons" propulsés au centre du plasma.

La quantité de tritium qui sera mise en œuvre pour les expérimentations chaque année (2 500 expériences par an environ) sera d'un kilogramme environ. A l'intérieur du plasma, la quantité de tritium sera inférieure à un gramme.

Système d'injection du combustible d'ITER

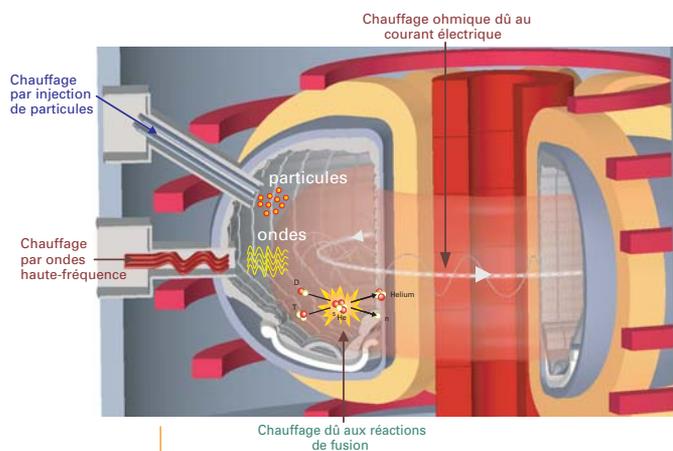


Vue d'un glaçon de deutérium injecté dans un plasma de Tore Supra

### Le chauffage du plasma

Plusieurs modes de chauffage seront mis en œuvre dans ITER pour atteindre les 100 millions de degrés nécessaires aux réactions de fusion :

- le chauffage ohmique qui est généré par le courant électrique induit par les bobines poloïdales\*. Il circule à l'intérieur du plasma et permet ainsi d'assurer le chauffage au début de l'expérience et d'atteindre une température de l'ordre de 10 millions de degrés ;



Différents modes de chauffage du plasma

- les systèmes de chauffages additionnels avec l'injection de particules de deutérium à très haute énergie et des ondes haute fréquence diffusées par des antennes (les ondes communiquent leur énergie aux ions et aux électrons du plasma) ;
- les réactions de fusion une fois déclenchées produisent de l'hélium à haute température qui participe à son tour au chauffage du plasma.

### Le confinement du plasma

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, selon le principe utilisé sur Tore Supra. Les propriétés supraconductrices des bobines permettent de maintenir en permanence la circulation du courant nécessaire à la création des champs magnétiques<sup>5</sup>. Il existera deux types de bobines supraconductrices :

- des bobines toroïdales\* qui servent à confiner le plasma,
- des bobines poloïdales\* qui contrôlent le courant et la position du plasma, et en partie sa température.

La chambre à vide sera couverte de modules de couverture\*, facilement remplaçables, qui seront constitués de matériaux absorbant la

<sup>5</sup> Les bobines supraconductrices fonctionnent à une température proche du zéro absolu (-269°C).

chaleur rayonnée et les neutrons générés par les réactions de fusion. Ils protégeront ainsi les bobines supraconductrices du flux de neutrons garantissant de la sorte leur durée de vie. La chaleur qui se déposera dans les composants internes et dans la couverture sera transférée à l'extérieur de l'enceinte au moyen d'un circuit de refroidissement à eau constitué d'une boucle primaire en contact avec les équipements de la chambre à vide et d'une boucle secondaire récupérant la chaleur pour l'acheminer vers des tours de refroidissement. 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. ITER sera ainsi la première machine intégrant les technologies essentielles au fonctionnement d'un réacteur de fusion produisant de l'électricité : composants face au plasma, circuit de gestion et de traitement du tritium (dont la détritiation\* des rejets atmosphériques), systèmes de champs magnétiques, robotique\*...

**Le dimensionnement du tokamak ITER**

Plus la taille d'un tokamak est importante, plus grande est sa capacité à confiner et chauffer un plasma, ce qui permet d'accroître le coefficient d'amplification de la puissance. La taille d'ITER permettra de générer des plasmas d'un volume de 840 m<sup>3</sup> avec un coefficient d'amplification de la puissance égal à 10 (à titre de comparaison, les volumes des plasmas de Tore Supra et du JET sont respectivement de 25 m<sup>3</sup> et de 100 m<sup>3</sup> ; le JET a atteint un coefficient d'amplification de la puissance de 0,64).

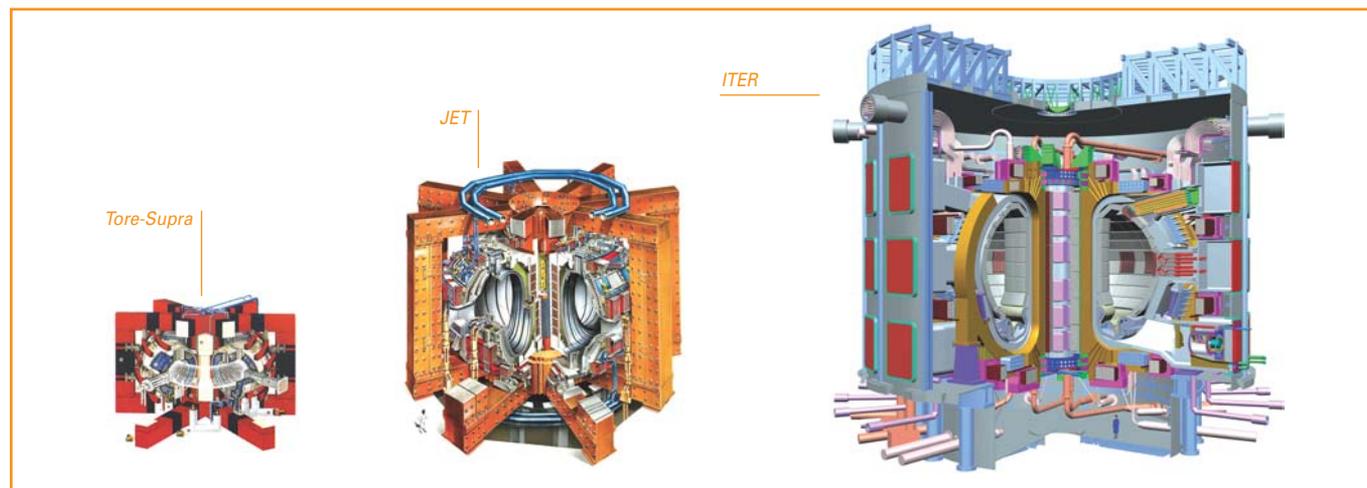
ITER sera le premier tokamak à générer et contrôler des plasmas, chauffés majoritairement par les noyaux d'hélium, produisant une puissance dix fois supérieure (500 MW) à celle

qui aura été injectée (50 MW).

Les facteurs d'amplification de la puissance mentionnés ci-dessus sont estimés au niveau du plasma lui-même. Pour l'étape suivante qui concernera la mise au point du futur réacteur de fusion (prototype DEMO) produisant de l'électricité, les études réalisées montrent que le coefficient d'amplification de la puissance devra être l'ordre de 30 pour une bonne rentabilité énergétique. Ce qui conduira à le dimensionner à une valeur un peu supérieure à celle d'ITER conduisant à une puissance comparable à celle des centrales nucléaires actuelles (environ 1 500 MW électriques).

**Comparaison des paramètres d'ITER à ceux de Tore Supra et du JET**

Paramètres	Tore Supra	JET	ITER
Grand rayon du plasma	2,40 m	3 m	6,2 m
Petit rayon du plasma	0,72 m	1,25 m	2,0 m
Volume du plasma	25 m <sup>3</sup>	100 m <sup>3</sup>	840 m <sup>3</sup>
Courant plasma	1,7 MA*	5-7 MA*	15 MA*
Champ magnétique	4,5 Tesla	3,4 Tesla	5,3 Tesla
Type de plasma	Deutérium	Deutérium-tritium	Deutérium-tritium
Puissance thermique	Non significative	16 MW (en D-T)	500 MW
Facteur d'amplification de la puissance (Q)	~ 0	0,64	≥10
Puissance neutronique au bord	Non significative	60 kW/m <sup>2</sup>	0,6 MW/m <sup>2</sup>
Durée des impulsions	1000 secondes	10 secondes	> 400 secondes et permanent à puissance réduite

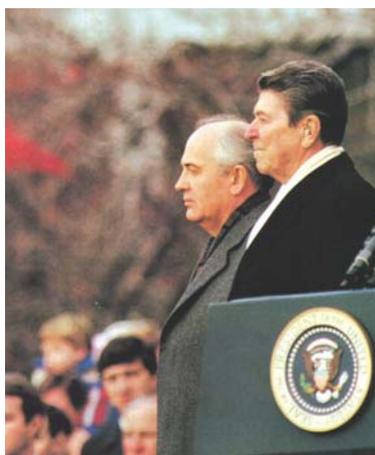


# Le projet ITER : son évolution, son organisation

*L'organisation d'ITER a évolué au cours des différentes phases du projet.  
Un rappel historique s'impose donc en préambule.*

## Un peu d'histoire...

L'initiative d'une collaboration internationale sur la fusion revient au dernier président de l'Union soviétique, Mikhaïl Gorbatchev, qui propose en novembre 1985, à son homologue américain Ronald Reagan de mettre en commun l'expérience de leurs deux pays dans le domaine de la fusion nucléaire pour construire ensemble une nouvelle installation de recherche. L'Union européenne et le Japon, eux aussi très avancés dans ce domaine, adhèrent très rapidement au projet.



Après les premières études conceptuelles, d'avril 1988 à décembre 1990, un accord

international regroupant les quatre partenaires ci-dessus (entre temps, la Fédération de Russie s'est substituée à l'Union soviétique) est signé en juillet 1992 sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

L'objectif de cet accord, appelé ITER EDA ("Engineering Design Activities" – activités de dimensionnement d'ITER), est de réaliser la conception détaillée d'une machine avec toutes les données techniques et budgétaires correspondantes capable de démontrer en particulier qu'il est possible, scientifiquement et techniquement, de produire un plasma produisant une puissance supérieure à celle qui aura été fournie. C'est ce qu'on appelle la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion.

Lors de la remise de ce dossier (juillet 1998), les États-Unis décident de se retirer considérant le projet comme étant trop ambitieux, après avoir honoré leurs engagements.

Les trois partenaires restants se fixent pour objectif de redimensionner, d'ici juillet 2001, le projet tout en gardant ses objectifs scientifiques et moyennant une révision de certaines performances, notamment la puissance.

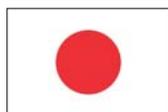
Un nouveau dossier de dimensionnement est remis en juillet 2001. Le budget, de l'ordre de la moitié de celui présenté en juillet 1998, est cette fois-ci accepté par les trois partenaires (Union européenne, Japon, Fédération de Russie). En parallèle, le Canada fait une offre de site près de Toronto. Les trois partenaires et le Canada décident alors d'ouvrir les négociations pour :

- définir l'organisation chargée de coordonner la construction de l'installation, son exploitation scientifique et son démantèlement ;
- choisir un site pour son accueil ;
- choisir un directeur général et son équipe ;
- partager les contributions.

Des équipes de négociateurs sont mandatées par leurs gouvernements. En Europe, c'est la Commission européenne qui reçoit mandat du Conseil des ministres européens en charge de la Recherche.

Début 2003, la Chine demande à se joindre aux négociations et les États-Unis à y revenir. Quelques mois plus tard, la République de Corée fait une demande à son tour et en décembre 2005 la candidature de l'Inde est acceptée. Les sept partenaires d'ITER (après le retrait de l'offre de site canadienne) sont :

- la Chine
- la République de Corée
- les États-Unis d'Amérique
- la Fédération de Russie
- l'Inde
- le Japon
- la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique



Analyse de candidatures de sites pour l'accueil d'ITER par des experts



L'ensemble des pays concernés, 31 pays dont les 25 pays européens, représentera plus de la moitié de la population mondiale. C'est la première fois qu'un projet de

coopération scientifique rassemble dès son lancement un partenariat international aussi large. La participation à ITER est ouverte à d'autres pays, sous réserve qu'ils en acceptent les règles de fonctionnement et que les partenaires actuels décident à l'unanimité d'accepter la nouvelle candidature.

## L'organisation d'ITER

Le projet ITER sera structuré selon trois niveaux : international, le niveau propre à chaque partenaire (Union européenne, Etats-Unis, Japon, Fédération de Russie, Chine, République de Corée et l'Inde), le niveau de la France en tant que pays d'accueil.

### Au niveau international : l'organisation internationale ITER

L'organisation internationale ITER (International Legal Entity) fera l'objet d'un traité international en cours de finalisation. Ce traité pourrait être signé à l'été 2006 pour une entrée en vigueur à la fin 2007 après ratification par chaque partenaire. En tant que maître d'ouvrage et exploitant nucléaire, l'organisation internationale ITER qui sera implantée sur le site de Cadarache aura la responsabilité de la construction, de l'exploitation et de la cessation définitive d'exploitation\* de la machine. Elle assurera également une mission de contrôle des prestations des agences domestiques.

Un directeur général<sup>6</sup>, responsable de l'organisation internationale pour ITER, rendra compte à un conseil ITER constitué de représentants des partenaires du projet. Ce conseil sera lui-même épaulé par plusieurs comités en charge de certains aspects spécifiques (programme scientifique, budget, gestion du personnel...) et des auditeurs externes. Ce type de structure existe déjà pour les grands organismes scientifiques internationaux comme le CERN\*, l'agence spatiale européenne (ESA)...

## Répartition des "contributions en nature"

Une partie des composants et équipements nécessaires à la construction d'ITER seront construits chez les partenaires (contributions en nature des partenaires), puis acheminés sur le site de Cadarache. Cela concerne, pour la plupart, des composants de haute technologie (secteurs de l'enceinte à vide, bobines supraconductrices...). Leur répartition entre les partenaires fait l'objet des négociations internationales et reste à finaliser au moment où le dossier du débat est élaboré. Le principe d'un partage équitable entre les 6 partenaires hors Europe et une contribution plus importante de l'Europe qui participera à hauteur de 50 % du coût de la construction est cependant acquis. L'Europe aura, en particulier, à sa charge la construction des bâtiments. Elle participera aussi à la fourniture de composants et de prestations de haute technologie.

### Au niveau de chaque partenaire : une agence «domestique»

Chacun des partenaires ITER disposera d'une agence "domestique".

Une spécificité d'ITER est l'importance de la notion d'*apport en nature*. Chaque partenaire créera donc sur son territoire, une «agence domestique» qui sera en charge principalement de la construction de sa part de composants d'ITER et de leur mise à disposition auprès de l'organisation internationale ITER. Chaque partenaire aura la responsabilité de fournir sur son propre budget un certain nombre de composants, selon les spécifications établies par l'équipe ITER internationale et sous son contrôle, qui seront ensuite assemblés sur site. Cette contribution «en nature» permet d'optimiser les ressources financières, dans la mesure où chaque partenaire ne finance que la partie qui lui incombe, tout en profitant des résultats scientifiques de l'ensemble du projet.

Le personnel de l'organisation internationale ITER, en interaction constante avec les agences domestiques, assurera la cohérence d'ensemble. L'agence domestique européenne pour ITER (European Legal Entity), qui devrait être constituée au cours de l'année 2006, sera implantée à Barcelone en Espagne, en raison de l'accord conclu suite à la négociation entre la France et l'Espagne en novembre 2003 qui a conduit au choix du site européen de Cadarache.



Barcelone

<sup>6</sup> Le premier directeur général de l'organisation internationale ITER, Kaname IKEDA, a été désigné le 7 novembre 2005 à Vienne par les partenaires d'ITER.



Lycée International  
de Luynes

## Au niveau de la France

L'efficacité et la qualité de la gouvernance du projet ITER, que ce soit au niveau international, au niveau européen ou au niveau national, sont des éléments déterminants de sa réussite. Au niveau national, il s'agit de la crédibilité de la France dans sa capacité à accueillir sur son sol de grands équipements scientifiques dans un cadre de coopération internationale. Pour ce qui concerne la gouvernance au niveau français, différentes missions sont identifiées :

### ■ Une mission étatique assumée au niveau gouvernemental<sup>7</sup> :

- de coordination et de suivi des actions de tous les acteurs : SGAE\*, administrations centrales des ministères concernés, Préfet de Région PACA, agence technique et financière au sein du CEA, organismes de recherche : CEA, CNRS, universités,..., pour veiller au respect des engagements pris et assurer, au niveau souhaité, une participation au projet de la communauté scientifique et industrielle nationale,
- de représentation de la France au sein des instances internationales impliquées, notamment la Commission européenne, l'Agence domestique européenne pour ITER (ELE : European Legal Entity) et l'organisation internationale pour ITER (ILE : International Legal Entity), et auprès des partenaires internationaux du projet et des pays membres de l'Union européenne, en vue de la défense des intérêts de notre pays,
- d'animation de la concertation interne au gouvernement pour préparer les discussions internationales et assurer le suivi des enjeux stratégiques pour la France tout au long du déroulement du projet,

### ■ Des missions de mise en œuvre des engagements, pris en tant que pays d'accueil, assumées par des services déconcentrés

#### ● 1. Les services de l'Etat en région

Le préfet de région a reçu du Premier ministre une lettre de mission lui donnant délégation notamment pour :

- la création d'une école internationale ;
- la maîtrise du foncier en vue de la réalisation de logements pour les personnels d'ITER ;
- l'aménagement d'un itinéraire routier d'acheminement de charges exceptionnelles
- l'aménagement portuaire.

Une équipe de projet spécifique et rassemblant les différentes compétences de l'Etat en région est mis à sa disposition pour l'aider dans sa mission.

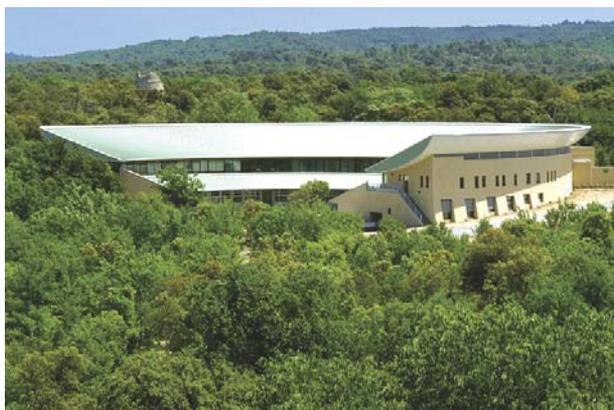
- 2. Une agence technique et financière, implantée au sein du CEA, sous forme d'un service spécialisé  
Conformément aux engagements pris par la France auprès de la Commission européenne, le comité de l'énergie atomique



<sup>7</sup> François d'Aubert a été nommé ambassadeur haut représentant pour la réalisation en France du projet ITER (décret du 21 novembre 2005).

du 5 juillet 2005 a décidé le principe de constitution d'une agence, dénommée agence ITER France, au sein du CEA, bénéficiant d'une autonomie budgétaire et administrative. En particulier, son rôle sera notamment :

- de réunir, avec le concours du responsable de la mission étatique ITER et le préfet de région, les moyens français, fonds et apports en nature, qu'ils proviennent des collectivités locales, de l'Etat, du CEA ainsi que de réaliser leur reversement à l'ELE
- de préparer le site et l'accueil du projet en liaison avec la préfecture de région, à l'exclusion des opérations à la charge directe des administrations (route, foncier, aménagement portuaire, école internationale). ITER France, via le CEA, mettra à disposition de l'ILE, à titre gratuit, un terrain viabilisé de 180 ha, dans une zone adjacente au centre du CEA
- par délégation des partenaires internationaux :
  - de présenter le projet durant le débat public
  - d'assurer la préparation et la présentation des dossiers de sûreté et de sécurité de l'installation
- d'assurer l'interface technique et opérationnelle vis-à-vis de l'ELE et de l'ILE ou des organisations qui les préfigurent.
- d'assurer la maîtrise d'ouvrage du démantèlement de l'installation sur la base des ressources financières provisionnées à cet effet, pendant l'exploitation de la machine par les partenaires du projet. La maîtrise d'ouvrage pour les phases de construction et d'exploitation sera placée sous la responsabilité de l'ILE.



Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) à Cadarache

#### ■ Une mission scientifique

En accompagnement de la construction et du fonctionnement de la future machine, la France se doit de mettre en place un programme national d'enseignement, de formation et de recherche en fusion magnétique qui comporterait notamment :

- la création d'une formation supérieure de niveau mastère et école d'ingénieur en étroite collaboration avec l'Institut national des sciences et techniques nucléaires et les écoles doctorales concernées des universités partenaires ;
- la définition d'un programme de recherche et la coordination scientifiques des équipes françaises ;
- la diffusion de la culture scientifique et technologique de la fusion nucléaire ;
- la coordination scientifique avec les équipes internationales.

#### ■ Une mission industrielle

L'Etat veillera, par ailleurs, à ce que le projet bénéficie pleinement au tissu industriel et économique national tant dans la phase de construction que par les innovations technologiques qu'il générera.





## Cadarache, site pour ITER : d'une candidature à une décision

*Le choix de construire ITER à Cadarache à proximité du CEA/Cadarache, grand pôle de recherche sur l'énergie, est le fruit d'une décision internationale prise le 28 juin 2005, lors d'une réunion inter-ministérielle qui s'est tenue à Moscou. Quatre pays (Canada<sup>8</sup>, Espagne, France, Japon) s'étaient déclarés candidats en 2002 pour accueillir la machine ITER, et de ce fait accueillir également les équipes internationales scientifiques qui exploiteront la machine et participeront aux expérimentations ; parmi ces pays, la France avec le site de Cadarache.*

La sélection du site s'est faite en deux étapes :

- Sélection du site européen entre les deux sites proposés : le site de Cadarache en France et le site de Vandellós en Espagne. Le site de Cadarache a été retenu comme site européen le 26 novembre 2003, lors d'un vote à l'unanimité du conseil des ministres européens de la recherche (conseil "compétitivité").
- Sélection du site final : les sites de Cadarache et de Rokkasho-Mura au Japon restaient seuls en concurrence. Après différentes études comparatives, c'est le site de Cadarache qui a été sélectionné à l'unanimité par l'ensemble des partenaires le 28 juin 2005.



*Visite de Janez Potočnik commissaire Européen à la recherche (à droite) le 3 juillet 2005 à Cadarache en présence de François d'Aubert, Bernard Bigot, François Goulard et Claudie Haigneré.*

### La candidature du site de Cadarache

*En 1981, l'ensemble des équipes fusion françaises ont été regroupées sur le site du CEA/Cadarache, à court terme en vue de la construction de Tore Supra actuellement en service, mais aussi à long terme dans la perspective de la mise en place d'un grand centre international de recherche dans le domaine de la fusion. Dès 1992, alors que l'équipe internationale débutait les études d'ingénierie détaillées d'ITER, le CEA menait les premières investigations techniques concernant la capacité de Cadarache à accueillir le projet. En juillet 2000, le dimensionnement du projet ITER étant en cours d'achèvement avec une très forte mobilisation internationale, la France a proposé aux partenaires européens et internationaux d'étudier la possibilité d'accueillir ITER à Cadarache. Un des atouts du site proposé réside dans la proximité immédiate du centre de recherche CEA/Cadarache, pôle de recherche français sur l'énergie qui possède une expérience et une expertise très fortes dans le domaine de la fusion en particulier et du nucléaire en général. La candidature de Cadarache à l'accueil d'ITER a été confirmée le 30 janvier 2003 par le Premier ministre français, puis le 26 novembre 2003 par le conseil des ministres européens.*



*Vue aérienne du CEA / Cadarache*

<sup>8</sup> Site dans l'Ontario proposé officiellement en juillet 2001.

# Description de l'installation ITER à Cadarache

## Localisation

Implanté sur la commune de Saint Paul-lez-Durance (Bouches-du-Rhône), le site proposé pour la construction d'ITER est en bordure nord-est de l'actuel centre du CEA/Cadarache sur un terrain public de 180 hectares géré actuellement par l'ONF (Office National des Forêts). Cet emplacement a été retenu sur des critères techniques : accessibilité, présence d'un sous-sol calcaire particulièrement stable et proximité immédiate de la ligne 400 kV qui alimente l'installation Tore Supra.

## Les bâtiments de l'installation ITER

L'installation ITER formera un ensemble d'une vingtaine de bâtiments regroupés en deux zones principales :

- la zone nucléaire constituée de quatre ensembles distincts :
  - les bâtiments de l'installation tokamak : le bâtiment tokamak, qui abritera la machine ITER proprement dite, le hall de montage<sup>9</sup>,

le hall des diagnostics et le bâtiment de traitement du tritium ;

- les bâtiments abritant les auxiliaires nécessaires au fonctionnement du tokamak (équipements pour les alimentations électriques, pompes et tours de refroidissement, système de cryogénie, etc.) ;
  - une salle de contrôle commande ;
  - un bâtiment de gestion des composants radioactifs et d'entreposage des déchets ;
  - un bâtiment pour des bureaux et laboratoires.
- une zone de services au sein de laquelle seront regroupés les bureaux, le restaurant d'entreprise et le bâtiment d'accueil du public.

## Les alimentations en électricité et en eau

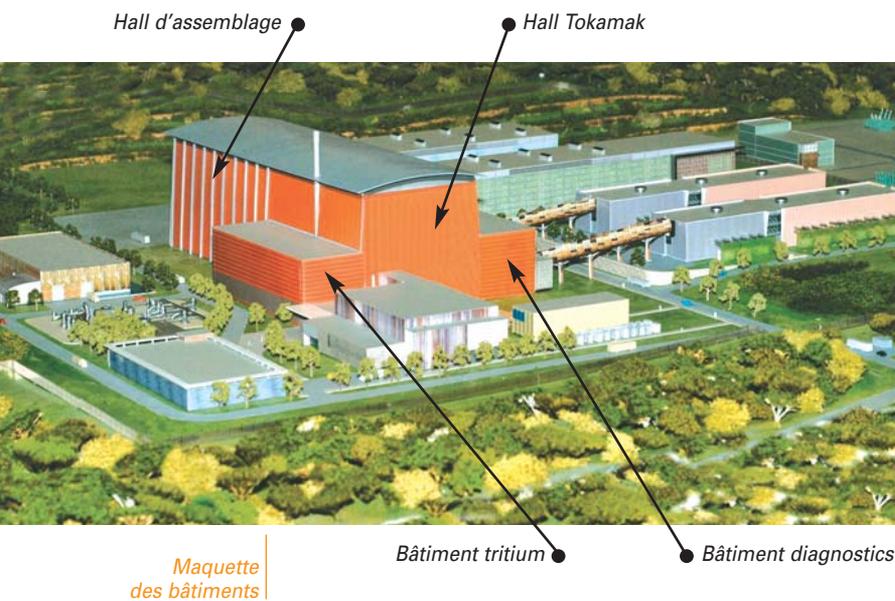
### Les besoins en puissance électrique

Du fait de son caractère expérimental, ITER ne fonctionnera pas en permanence mais selon des campagnes d'expériences de deux semaines (une quinzaine par an en moyenne) entrecoupées de périodes d'arrêt servant à des



Implantation d'ITER  
(vue d'artiste)

<sup>9</sup> Une fois le montage de la machine terminée, ce hall sera utilisé pour abriter les équipements des chauffages par ondes haute fréquence.



opérations de maintenance, de mise au point et d'amélioration des équipements. Chaque campagne expérimentale sera, elle-même, constituée d'une succession d'expériences et de périodes de veille. Ce qui représentera environ 2 500 expériences par an avec 200 jours de fonctionnement. La puissance électrique consommée sera différente selon les périodes :

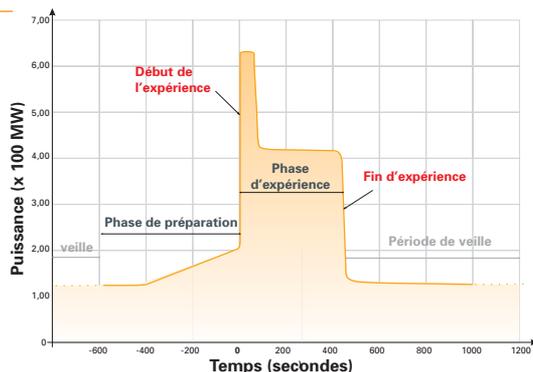
#### ■ En période d'arrêt et de veille

La puissance électrique consommée sera de quelques MW en période d'arrêt pour le maintien des systèmes informatiques, de l'éclairage, de la ventilation par exemple. Elle atteindra 120 MW en période de veille durant laquelle les équipements nécessaires au fonctionnement doivent être opérationnels (systèmes de pompage, de réfrigération, cryogénie...).

#### ■ Pendant une expérience

Pendant une expérience, la consommation électrique variera entre 120 MW et 620 MW.

Puissance électrique consommée au cours d'une expérience ITER

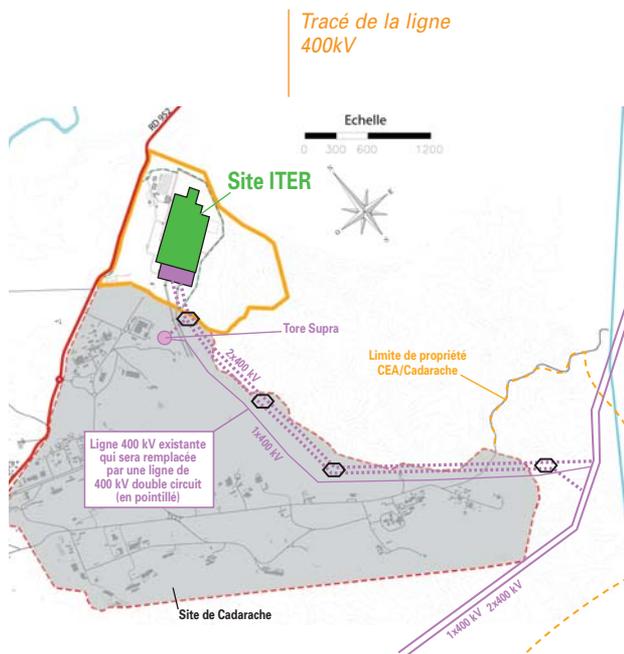


Durant la phase de préparation, qui durera environ 400 secondes, la puissance électrique consommée passera progressivement de 120 MW à 220 MW. Ensuite, elle atteindra 620 MW durant la phase de montée en température du plasma (une trentaine de secondes), avant de redescendre à 450 MW pendant la phase principale de l'expérience (370 secondes), et de revenir à 120 MW.

Des systèmes de compensation limiteront l'impact d'ITER sur le réseau électrique régional existant, lors du pic de puissance de 620 MW, à des valeurs inférieures aux normes européennes en vigueur fixées, notamment pour les chutes de tension sur les réseaux, par l'Union pour la coordination de la transmission de l'électricité (UCTE).

Chaque année, la consommation électrique d'ITER sera de l'ordre de 600 GWh, soit l'équivalent d'environ 7% de la production annuelle d'une tranche d'une centrale nucléaire 1300 MW (8200 GWh).

Le programme de fonctionnement d'ITER sera conduit avec un objectif permanent de limitation de la consommation énergétique.



Par ailleurs, ITER pourra être mis en veille durant les périodes de très forte consommation électrique, en particulier en hiver ou durant les périodes de canicule. Des dispositions d'économie d'énergie sont prévues pour les bâtiments : construction suivant les dernières recommandations de haute qualité environnementale, mise en place de systèmes de mise en veille...



**Alimentation en électricité**

La puissance électrique requise sera fournie par une ligne 400 kV à double circuit qui remplacera, sur le même tracé, la ligne 400 kV à simple circuit alimentant depuis 1987 Tore Supra. Cette double ligne, qui sera prolongée d'un kilomètre environ au-delà de Tore Supra, sera raccordée sur la ligne existante Tavel/Boutre appartenant au gestionnaire du Réseau de transport d'électricité (RTE\*). Aucune modification du réseau électrique régional ne sera nécessaire. En cas de défaillance du réseau 400 kV, les fonctions de sûreté de l'installation pourraient être assurées par le réseau électrique du centre de Cadarache indépendant du réseau 400 kV. Si ce réseau était à son tour défaillant, deux générateurs diesel d'une puissance électrique de 6,3 MW maintiendraient en fonctionnement tous les systèmes importants pour la sûreté de l'installation.

**Alimentation en eau**

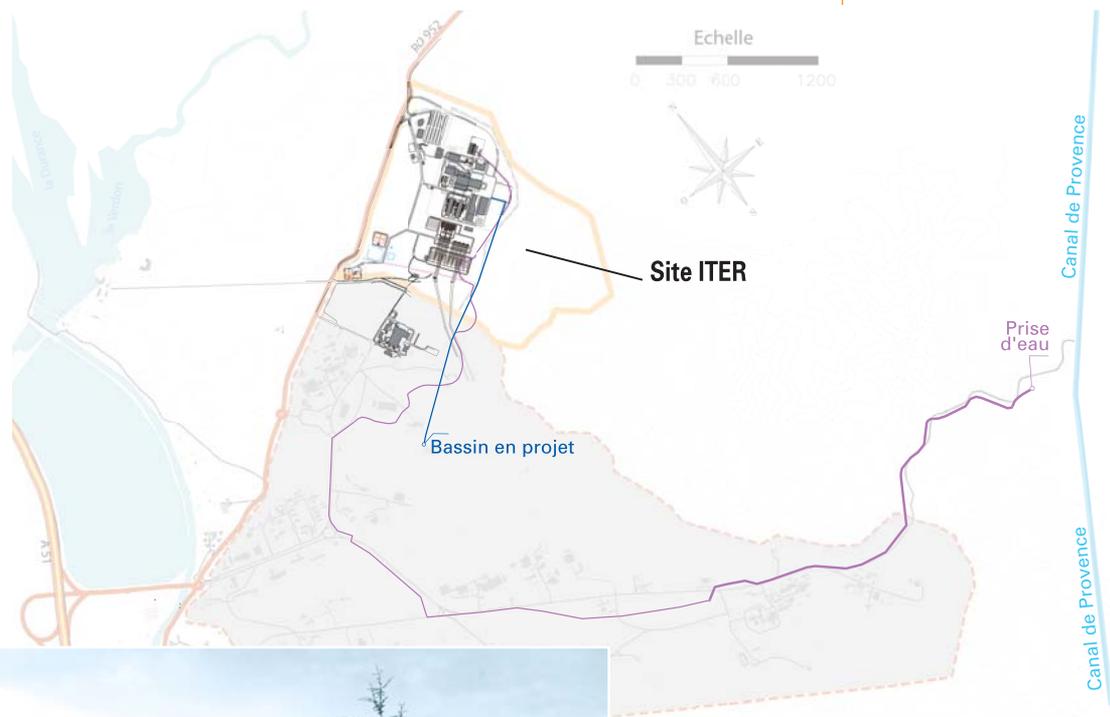
Le système de refroidissement devra évacuer la puissance thermique générée par le fonctionnement d'ITER. Au moment des expériences, une puissance thermique maximale de l'ordre de 1200 MW devra être évacuée. Cette puissance correspondant

aux pertes calorifiques dans les différents équipements d'ITER auxquels s'ajoute la puissance produite par les réactions de fusion. A cette fin, il est prévu d'utiliser des tours à tirage forcé dans lesquelles le refroidissement sera assuré par évaporation d'eau.

Ce régime de fonctionnement se traduira par un prélèvement d'environ 1,5 million de mètres cubes d'eau par an, dont les deux tiers seront évaporés dans les tours. L'eau sera prélevée dans le canal de Provence et conduite par gravité jusqu'à ITER par une canalisation. Le tiers non évaporé sera rejeté dans la Durance à une température inférieure à 30°, conformément à la réglementation en vigueur.

Ce prélèvement annuel de 1,5 million de m<sup>3</sup> représentera une très faible part (0,7 %) de la quantité d'eau véhiculée par le canal de Provence et n'aura pas d'impact pour les autres usagers du canal.

*Schéma d'alimentation en eau*

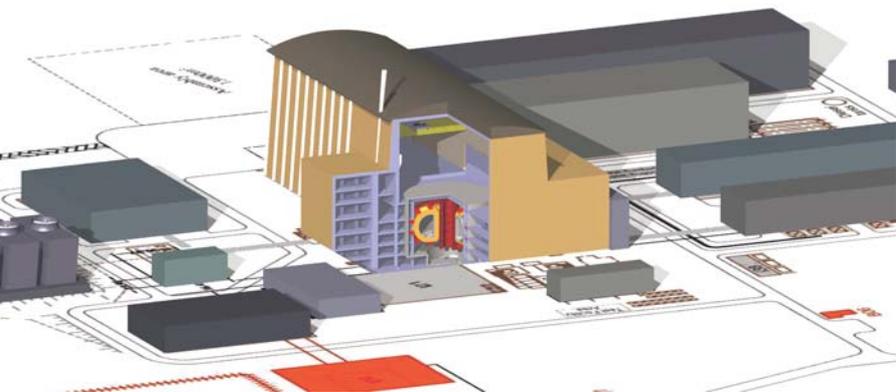


*Tours de refroidissement à tirage forcé*



## Le chantier ITER

Une dizaine d'années environ sont prévues pour la construction d'ITER.



Principaux bâtiments de l'installation ITER

### Etudes détaillées et de définition

À l'issue du débat public, les études détaillées permettront de préciser les solutions techniques qui seront mises en œuvre pour préparer le site et ses abords immédiats. Ces études comprennent en particulier l'aménagement de l'itinéraire pour l'acheminement des composants d'ITER et la viabilisation du site (alimentations électriques, en eau, traitement des effluents, téléphonie, internet...). Ces études, puis les travaux, seront placés sous responsabilité française. L'objectif est de rendre le site prêt pour la construction du bâtiment tokamak à la fin de l'année 2008.

Le début de la construction des bâtiments conventionnels (centre de relations publiques, bureaux, bâtiment médical, de contrôle des

accès...) est prévue en 2007 afin d'accueillir dans les meilleures conditions le personnel ITER et le public.

En parallèle, les études de définition de l'installation ITER seront poursuivies par l'équipe internationale ITER tenant compte des spécificités de Cadarache : normes et pratiques en vigueur en France et en Europe, caractéristiques techniques du site... Les dossiers réglementaires détaillés seront aussi écrits (en particulier dossiers pour les enquêtes publiques devant conduire à l'autorisation de création et au permis de construire).

### Démarrage des travaux

Le chantier de l'installation de recherche ITER proprement dite est prévu à partir de 2008. Le bâtiment en béton armé qui abritera le tokamak, le hall d'assemblage et le bâtiment où seront construites les bobines supraconductrices poloïdales\* jusqu'à 26 mètres de diamètre seront les premiers bâtiments construits. C'est dans le hall d'assemblage que les éléments du tokamak seront pré-assemblés avant d'être transférés dans "l'alvéole" en béton armé qui



### Valorisation des déblais

Les opérations de génie civil proprement dites commenceront avec le terrassement nécessaire à la réalisation des différentes plateformes. Compte tenu de la topographie naturelle du site, environ 3 millions de m<sup>3</sup> de matériaux devront être retirés. Un site d'entreposage des terres et roches excavées est prévu à proximité immédiate des installations d'ITER pour éviter les évacuations de roches par camions sur les voies publiques. Une partie des déblais pourra être concassée sur place pour les usages propres au chantier ITER. Deux options sont envisagées pour la gestion des déblais qui ne seront pas concassés : un stockage sur place ou une valorisation par des entreprises spécialisées en réponse à des besoins locaux.



entourera la machine. Les composants qui auront été fabriqués par les partenaires internationaux du projet seront acheminés au fur et à mesure à Cadarache. Les premiers "gros" composants attendus sont les poutres du pont roulant (environ 47 mètres de long) en 2009. Viendront ensuite les bobines supraconductrices toroïdales, les secteurs d'enceinte à vide... Puis, seront construits les autres bâtiments servant aux installations électriques, aux équipements de cryogénie (liquéfacteurs d'hélium, d'azote), de refroidissement... Cette phase de chantier sera suivie d'une phase de test des composants installés, puis des systèmes et enfin de la totalité de l'installation afin de démarrer les expériences et obtenir "le premier plasma" à l'horizon 2016 environ.

### Transport des composants jusqu'à Cadarache

La plupart des composants de la machine seront construits sur le territoire des partenaires, puis transportés et assemblés à Cadarache. Seuls, les composants intransportables par nature, comme les bâtiments, et ceux dont la taille dépassent les capacités de transport disponibles comme les bobines poloidales seront construits sur place.

#### ■ Description des composants

Les composants d'ITER seront acheminés par voie maritime depuis leur lieu de fabrication jusqu'au port de Fos-sur-Mer. Un tiers environ des composants pourra ensuite être acheminé jusqu'à Cadarache en empruntant l'itinéraire existant des convois exceptionnels. Les autres composants nécessiteront un mode de transport spécifique et un aménagement des équipements maritimes et routiers en certains points (quai de débarquement, élargissements, renforcements, etc).

Parmi les composants qui conduisent aux contraintes de transport les plus

importantes sont compris les 9 secteurs de la chambre à vide\* et les 19 bobines du champ toroïdal\* dont une bobine de rechange. Les dimensions et la masse de ces vingt-huit composants sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

#### ■ Itinéraires d'acheminement

Au terme des premières études de faisabilité, le transport par voie fluviale ou aérienne a été écarté essentiellement pour des raisons techniques.

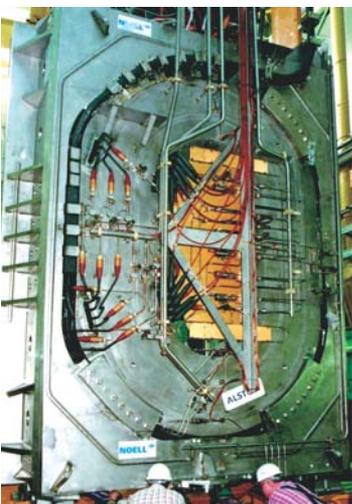
Différentes options ont été explorées pour l'acheminement des composants nécessaires à la construction d'ITER.



Exemple de convoi simulation des franchissements d'un giratoire

Au printemps 2003, des réunions ont été organisées par les sous-Préfets d'Aix-en-Provence et d'Istres avec les maires des communes concernées. Les remarques qu'ils ont formulées ont été prises en compte, des besoins se sont exprimés et des synergies possibles ont été identifiées.

Une maîtrise d'ouvrage d'État sera mise en place pour coordonner les aspects administratifs et l'ensemble des travaux nécessaires aux aménagements sur les itinéraires envisagés, en collaboration étroite avec le département des Bouches-du-Rhône. L'ensemble du transport des composants est prévu sur une période de cinq ans environ.



Dimensions des composants	Nombre	Largeur	Longueur	Hauteur	Masse
Secteurs de l'enceinte à vide (emballés)	9	8,50 m	14,10 m	7,45 m	600 t
Bobines de champ toroïdal (emballées)	19	8,50 m	17,30 m	9,10 m	530 t

## Transport des composants très exceptionnels

Le transport des composants les plus lourds s'effectuera par la route sur des plates-formes autopropulsées circulant de nuit à la vitesse maximale de 5 km/h. Ce qui représentera vingt-huit convois sur une période de deux ans. Un itinéraire d'une centaine de kilomètres au total, empruntant les voies existantes, a été défini avec les services du ministère de l'Équipement et les collectivités locales concernées pour l'acheminement de ces composants de l'étang de Berre jusqu'à Cadarache.

Le transfert de Fos-sur-Mer jusqu'à l'étang de Berre sera réalisé en barge.

estimé en 2005 pour une valeur de 65 millions d'euros<sup>10</sup> hors taxe. Certains aménagements présenteraient, de l'avis des services de l'Etat et des collectivités concernées, un intérêt général au-delà des besoins d'ITER et pourraient être pérennisés comme les élargissements de route, la rectification des virages du Garri par exemple.

Itinéraire de référence



Transport d'une bobine poloïdale de Tore Supra en 1986

D'autres aménagements auront un caractère provisoire et les sites concernés pourraient être remis à leur état initial après le passage du dernier convoi en fonction de l'intérêt que leur exploitation pourra présenter.

## Transports des autres composants

Les autres composants (environ 300), moins volumineux et moins lourds<sup>11</sup> que les vingt-huit composants détaillés ci-dessus, seront acheminés jusqu'à Cadarache sur des remorques conventionnelles tractées. Leur transport depuis le point de débarquement pourra s'effectuer dans l'espace d'une nuit ou d'une journée, à une vitesse moyenne de 30 km/h. Les deux tiers de ces convois emprunteront l'itinéraire spécialement aménagé après un transfert par barge entre le port de Fos-sur-Mer et l'étang de Berre.

Le tiers restant, concernant le transport de composants de taille et poids plus modestes, empruntera l'itinéraire existant des "convois exceptionnels" qui part du port de Fos-sur-Mer, passe par Saint-Martin-de-Crau, le sud de Salon de Provence, le nord d'Aix en Provence puis la RN96. Il évitera l'opération de transfert par barge à travers l'étang de Berre.

Les aménagements nécessaires sur l'itinéraire envisagé concernent :

- L'aménagement d'un contournement de la commune de Berre l'Etang ;
- La création d'une piste de circulation temporaire à l'intérieur de la base aérienne de Salon de Provence pour contourner Lançon-de-Provence ;
- La rectification des virages du Garri sur la RD561 au niveau de la commune de Rognes ;
- L'élargissement de la RD15 puis contournement de Peyrolles-en-Provence ;
- L'élargissement de la RD952 en surplomb de la Durance à hauteur du pont de Mirabeau.

L'ensemble des travaux à réaliser, qui inclut le renforcement de certains ouvrages d'art et l'aménagement de quelques carrefours, a été

<sup>10</sup> Financement prévu sur une partie de la contribution financière du conseil général des Bouches-du-Rhône.

<sup>11</sup> Composants pesant plus de 45 tonnes et/ou mesurant plus de 20 mètres et/ou plus de 3 mètres de large, comme les quatre poutres de pont roulant de 47 mètres de long.

# Coût et financement du projet ITER

## Introduction : coût global du projet

Durant la phase d'ingénierie, l'équipe internationale ITER, sur la base du dessin\* générique de l'installation et avec l'aide des industries des différents partenaires, a réalisé une estimation du coût global du projet comprenant :

- la construction qui se déroulera sur environ 10 ans ;
- son exploitation pendant environ 20 ans ;
- son démantèlement pendant 10/15 ans environ.

Chacun des partenaires a fait sa propre estimation du coût du projet, avec le concours de ses industriels. Le coût total de la construction a été évalué en tenant compte de tous les éléments (matières premières, main d'œuvre, composants...). Le coût d'exploitation a été évalué en tenant compte en particulier du retour d'expérience des installations actuelles (JET et Tore Supra en particulier). Le coût du démantèlement a été estimé en comparant différents scénarios, tous convergents.



Sur la base de l'ensemble des estimations effectuées, le coût global est estimé à 9,9 milliards d'euros sur 40 ans (valeur 2000 HT<sup>12</sup>) dont :

- 4 570 millions d'euros pour la construction de la machine sur environ 10 années ;
- 4 800 millions d'euros pour l'exploitation sur environ 20 ans ;
- 530 millions d'euros qui seront provisionnés durant la phase d'exploitation par les partenaires internationaux pour le démantèlement.

Les coûts relatifs à l'aménagement du site non inclus ci-dessus, ont été évalués en 2001 par l'équipe européenne en charge de la candidature de Cadarache, à 155 M€ (euros 2000 HT). Ceux-ci comprennent la viabilisation du site (amenées d'eau, d'électricité, de téléphone, internet, évacuation des effluents), ainsi que l'aménagement des infrastructures pour l'acheminement des composants et la construction d'une école internationale.



<sup>12</sup> Toute indication de budget d'ITER qui suit est en euros 2000 hors taxes.

## Coût et financement de la construction d'ITER

### Détail du coût de la construction

Le coût de construction prend en compte les coûts des composants de la machine, de la construction des bâtiments et de l'ingénierie.

La construction de l'installation ITER fait appel à deux types de réalisations :

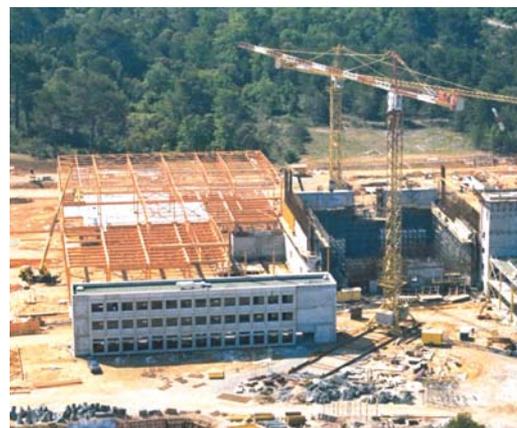
- des équipements et des travaux qui ne peuvent être réalisés que sur le site même de la future installation : la construction des bâtiments et l'assemblage par exemple ;
- des équipements et des composants qui peuvent être construits chez les partenaires puis livrés sur le site de l'installation : c'est le cas de la fabrication de la plupart des composants de l'installation, dont les composants de haute technologie.

Les coûts d'aménagement du site comprennent :

- la préparation du site (déboisement, terrassement, clôturage...);
- la viabilisation du site (amenées d'eau, d'électricité, téléphone, internet, effluents) ;
- les infrastructures pour permettre l'acheminement des composants d'ITER ;
- la construction d'une école internationale.

### Financement de la construction

L'Union européenne, dont la France, financera 50 % du coût de la construction détaillé ci-dessus, les six autres parties (Chine,



République de Corée, États-Unis, Japon, Russie, Inde) prenant en charge chacune 10 %. La participation de l'Inde qui a rejoint le projet ITER en décembre 2005 a permis la constitution d'une réserve à hauteur de 10% du coût de la construction d'ITER. Cette réserve est exclusivement destinée à couvrir les risques d'aléas techniques. Elle sera constituée par une contribution des différents partenaires à due concurrence de leur engagement initial réduisant d'autant la participation effective de chacun au coût de la construction du projet tel qu'il est aujourd'hui défini tout en maintenant le volume global de son engagement en cas de nécessité. L'Union européenne<sup>13</sup> financera 38 % de la construction d'ITER via le budget EURATOM, soit 1737 M€ sur 10 ans environ ; la France financera les 12 % restants soit 548 M€. La France prendra également à sa charge la totalité des dépenses d'aménagement du site hors clôture, de la construction de l'école internationale et de l'aménagement du territoire.

La contribution directe de la France à la construction d'ITER (en euros 2000 HT) s'établit donc au total à :

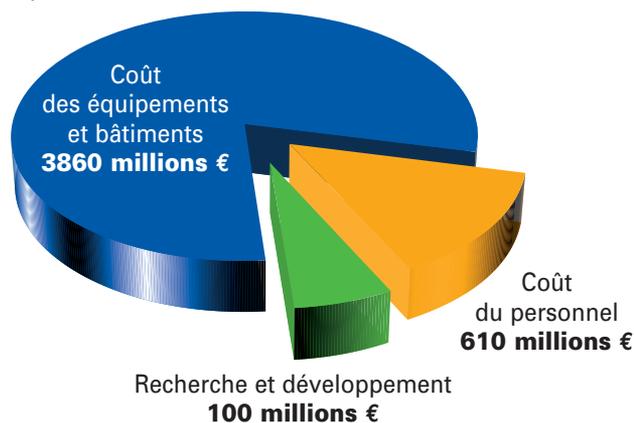
Contribution à la construction : .....548 M€  
 Aménagement du hors clôture : .....105 M€  
 Construction de l'école internationale : ..55 M€  
 Aménagement du territoire : .....27 M€  
**Total : .....735 M€**

### Financement de la part française pour la construction

Le financement de la contribution française (735 M€) pour la construction d'ITER (sur la base de 12 %) est assuré pour 467 M€ par les différentes collectivités territoriales de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et le reste par l'État.

## Répartition des coûts de construction de la machine ITER

(4570 millions d'euros (conditions économiques 2000) estimés pour un «site générique» défini par l'équipe internationale ITER répartis sur 10 ans



<sup>13</sup> Les recettes de l'Union européenne sont constituées en grande partie de ressources propres mises à disposition par les États membres de l'Union européenne. Dans ce cadre, la République Française contribue indirectement au projet ITER, par le biais de la contribution des Communautés européennes.

Les collectivités territoriales et leurs contributions sont les suivantes :



**le conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur : .....152 M€**  
*(dont 70 M€ pour la construction de la machine, 55 M€ pour l'école internationale, 15 M€ pour l'augmentation de la capacité de la ligne ferroviaire du Val de Durance, 12 M€ pour les actions régionales en faveur du foncier)*



CONSEIL GÉNÉRAL  
DES ALPES-MARITIMES

**le conseil général des Alpes-Maritimes : .....15 M€**



**le conseil général des Alpes-de-Haute-Provence : .....10 M€**



**le conseil général des Bouches-du-Rhône : .....152 M€**  
*(dont 46 M€ pour l'itinéraire d'acheminement des composants d'ITER)*



Hautes Alpes  
Conseil Général

**le conseil général des Hautes-Alpes : .....5 M€**



CONSEIL GÉNÉRAL

**le conseil général du Var : .....30 M€**



**le conseil général de Vaucluse : .....28 M€**



**la Communauté du Pays d'Aix (CPA) : .....75 M€**

Conscientes des retombées importantes de l'implantation du projet ITER à Cadarache et des enjeux en termes de développement régional, des collectivités ont, dès 2002, par des votes ou des motions prises dans les assemblées territoriales, manifesté leur soutien au projet.

Cette mobilisation s'est traduite par le financement partiel en 2003 des études préliminaires

nécessaires à l'accueil d'ITER en Provence. Le budget correspondant est de 670 000 €. Ces études préliminaires ont concerné :

- la communication,
- l'évaluation régionale du logement,
- l'éducation,
- l'impact environnemental du projet,
- la préparation du site,
- le transport des composants.



## Coût et financement de l'exploitation d'ITER

### Coût d'exploitation

Le budget total d'exploitation scientifique pendant 20 ans de l'installation ITER a été estimé par l'équipe internationale ITER à 4 800 millions d'euros, ce qui correspond à un budget annuel d'exploitation de l'ordre de 240 millions d'euros.

Le coût de la phase de cessation définitive d'exploitation\* (cf partie II, page 39), d'un montant de 430 millions d'euros, est compris dans ce budget d'exploitation.

### Financement de l'exploitation

Dans l'hypothèse d'un financement de l'exploitation d'ITER par l'Union européenne à hauteur de 34 %, dont 10 % à charge de la France, la contribution directe (hors contribution indirecte via le budget Euratom) de la France à l'exploitation d'ITER serait de 480 millions d'euros, soit 24 M€/an pendant 20 ans.

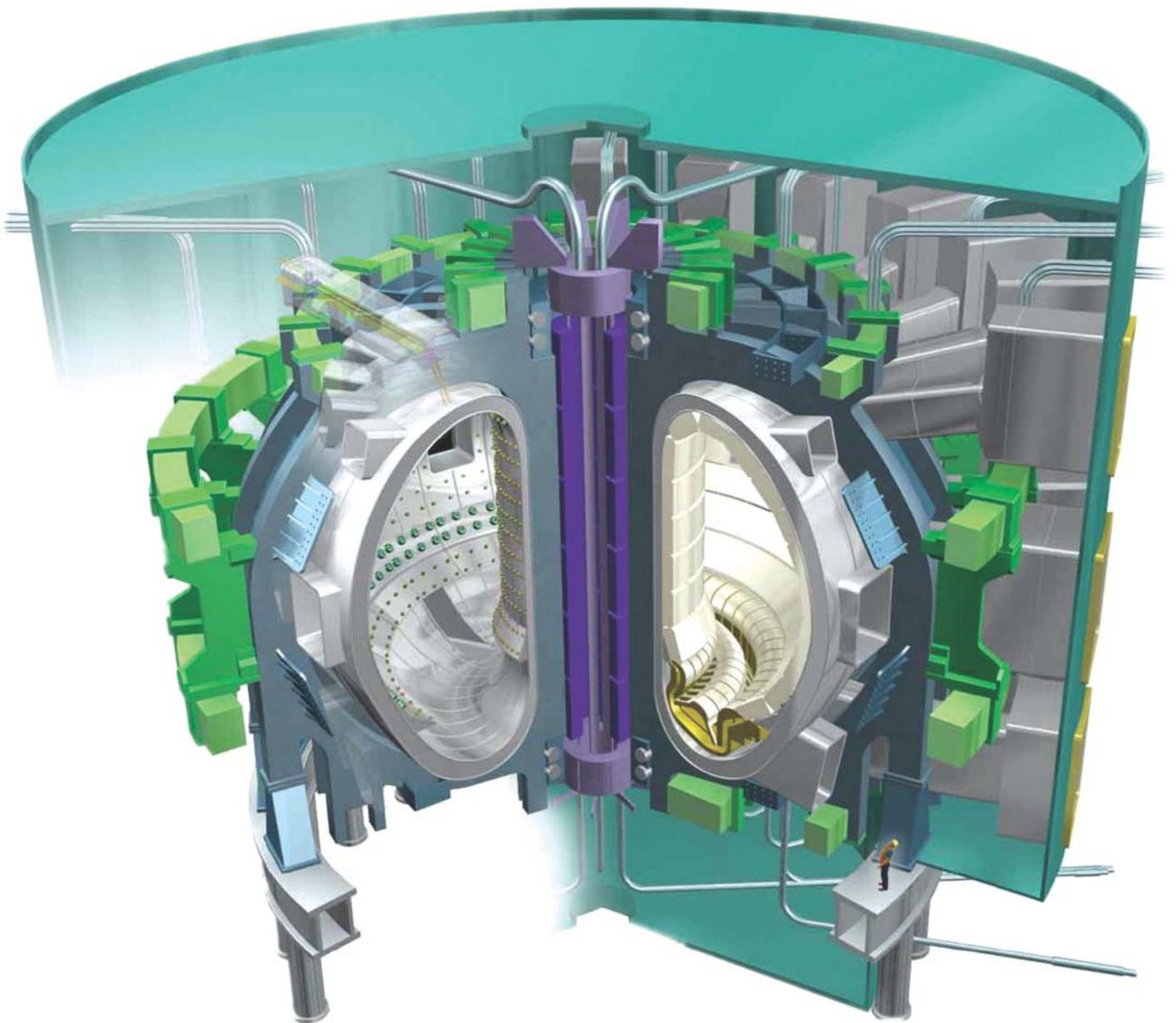


## Coût et financement du démantèlement d'ITER

La phase de cessation définitive d'exploitation\* sera suivie de la phase de démantèlement qui sera effectuée selon la réglementation française et sous la responsabilité de l'agence ITER-France. Pour cette dernière phase, une provision d'un montant total de 530 millions d'euros sera constituée par l'ensemble des partenaires ITER tout au long des 20 ans d'exploitation de l'installation (26,5 M€/an pendant 20 ans).



Opération de maintenance dans Tore Supra



*Intérieur d'ITER  
(vue d'artiste)*