

# Les Matériaux Face au Plasma

Objectif

Les composants face au plasma

La couverture tritigène

ITER vs. Reacteur

Jean-Marc.Martinez@iter.org

ITER: Réacteur Thermonucléaire Expérimental International

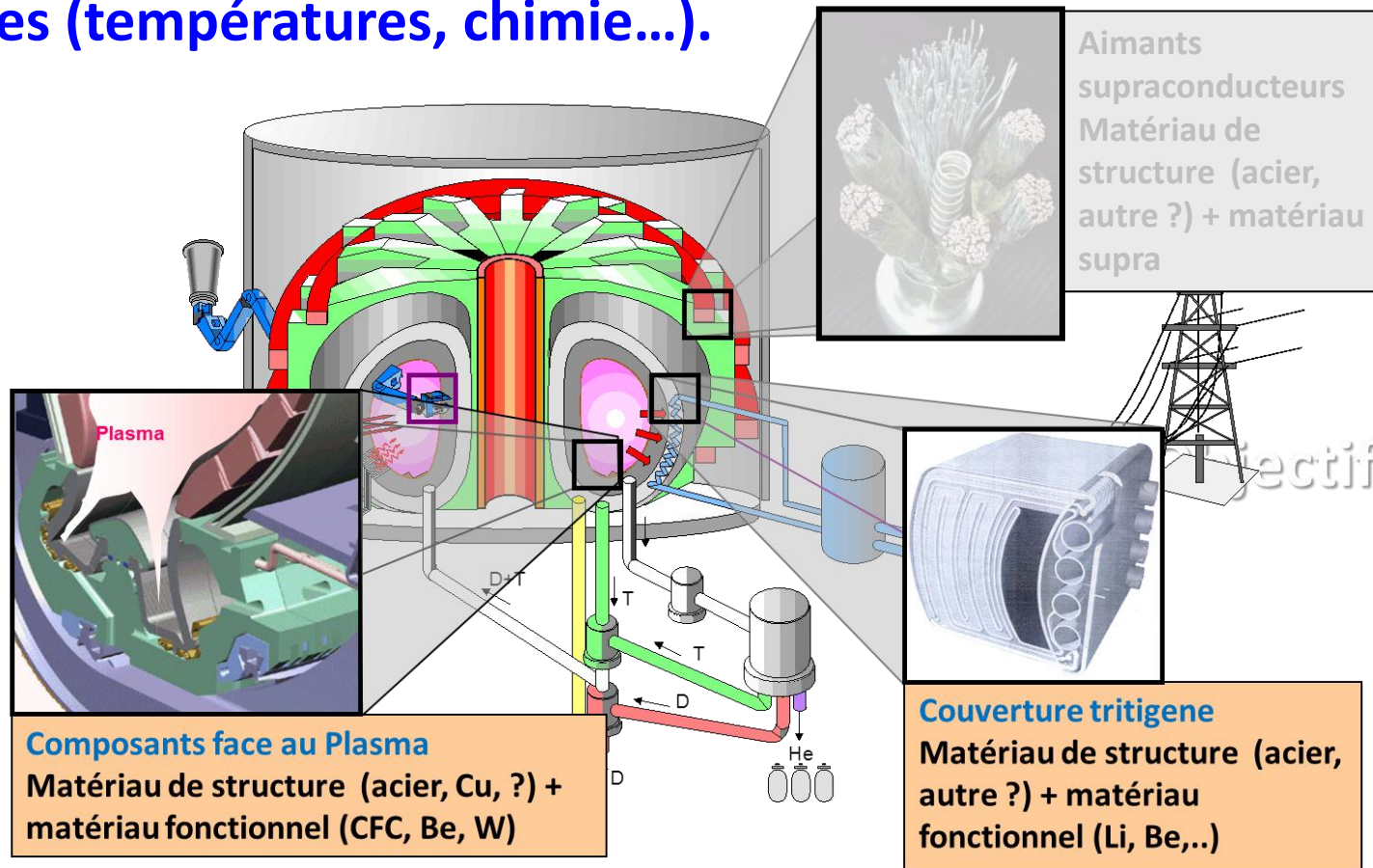
Le « chemin » (en latin) vers une démonstration de la faisabilité et la sûreté de l'énergie de fusion.



**the way to new energy**

© P. Magaud  
– S. Panayotis, C. Portafaix & V. Barabash -

Un défi majeur à résoudre dans un réacteur à fusion thermonucléaire:  
**Le développement de matériaux résistants à des environnements extrêmes (températures, chimie...).**



**Zoom sur les matériaux face au plasma et ceux composants la couverture tritigène**

Un défi majeur des composants face au plasma à résoudre dans un réacteur à fusion thermonucléaire:

## **Le développement de matériaux résistants**

Objectif: Diminuer la fréquence de remplacement des composants afin d'améliorer la disponibilité du réacteur, et donc le coût de l'électricité produite.

A titre d'exemple, il y a 80% de disponibilité pour un réacteur à eau pressurisée.

## **Choix des matériaux selon la fonction du composant et des sollicitations**

## Rappels :

## Les composants face au plasma

**Chambre à vide** parfaitement hermétique à double paroi en acier inoxydable entre lesquelles circulera l'eau de refroidissement. Située à l'intérieur du **cryostat**, elle est le siège de la réaction de fusion et constitue une partie de la **première barrière de confinement**. Les **composants face au plasma** sont fixés à sa paroi interne.

**Sa taille détermine le volume du plasma de fusion et donc l'énergie produite**

diamètre interne = 6m,

Largeur = 19m

Hauteur = 11m

Masse (sans CFP) = 5000t.



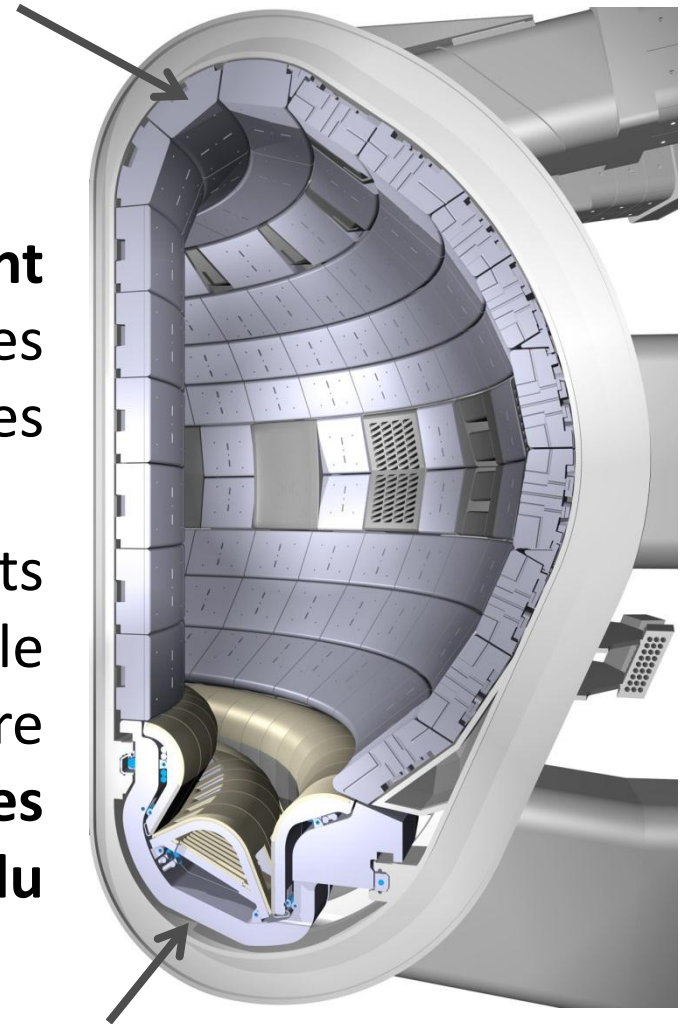


## Rappels :

## Les composants face au plasma

- Les **modules de couverture** protègent l'intérieur de la chambre à vide contre les charges thermiques élevées et contre les neutrons de haute énergie.
- Le **«divertor»** est l'un des composants fondamentaux d'ITER. Courant sur le «plancher» de la chambre à vide, il assure l'extraction de la chaleur, des cendres d'hélium et d'autres impuretés issues du plasma.

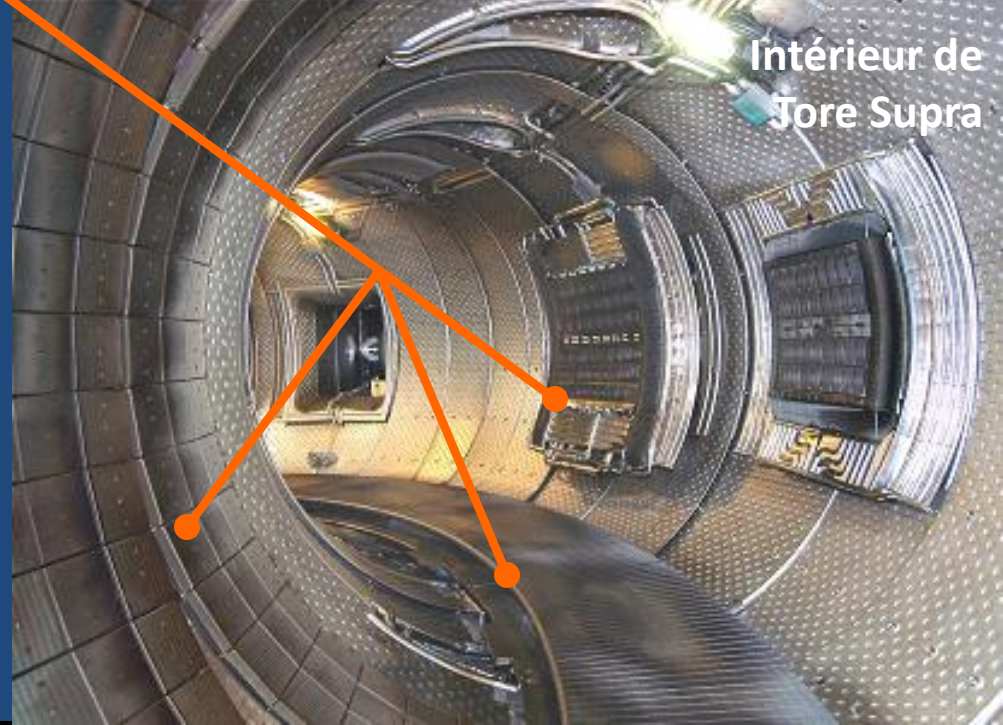
Modules de couverture



Divertor

# Les composants face au plasma

Ils composent la **première surface matérielle** vue par le plasma exposée à de nombreuses contraintes : thermique (plusieurs MW/m<sup>2</sup>), neutronique, érosion...



Intérieur de Tore Supra

100 000 000 degrés (centre)

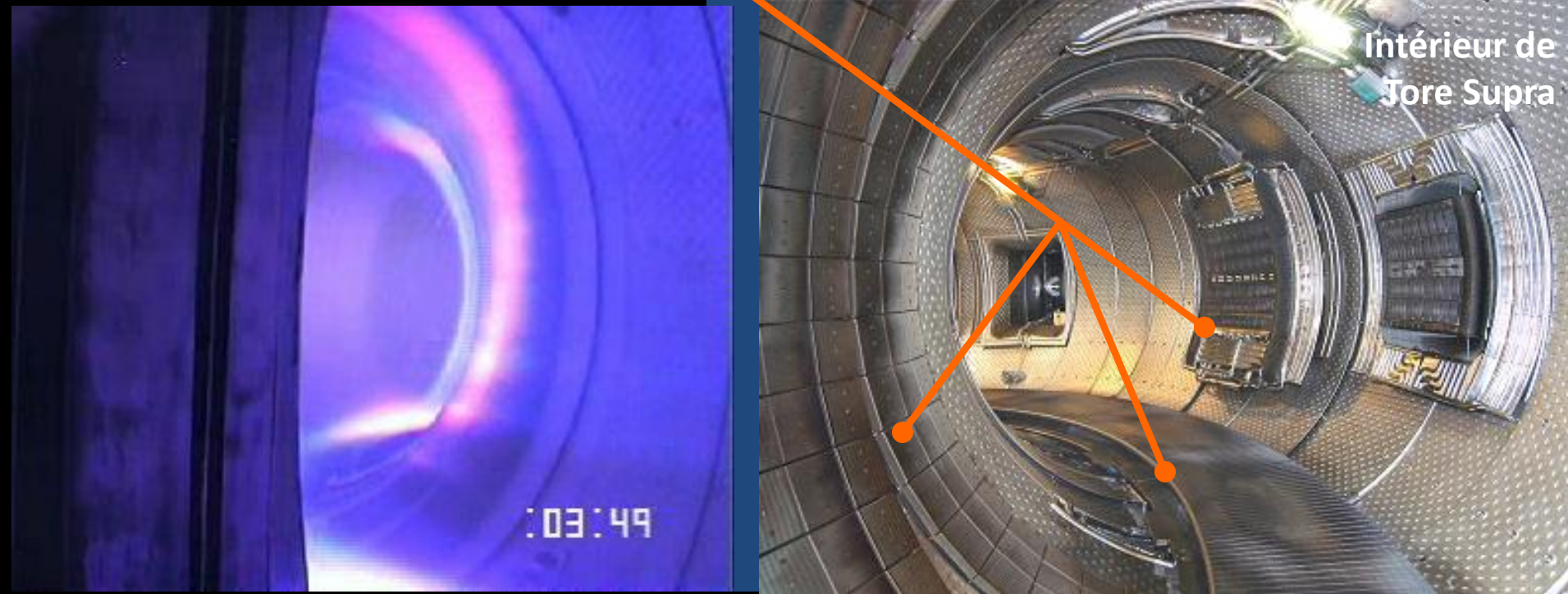
1 000 degrés (paroi)

© Philippe Magaud



# Les composants face au plasma

Ils composent la **première surface matérielle** vue par le plasma exposée à de nombreuses contraintes : thermique (plusieurs MW/m<sup>2</sup>), neutronique, érosion...



Intérieur de  
Tore Supra

La fonction principale est **de minimiser la pollution du plasma**

© Philippe Magaud

Rappel : impuretés → dégrade les performances plasma

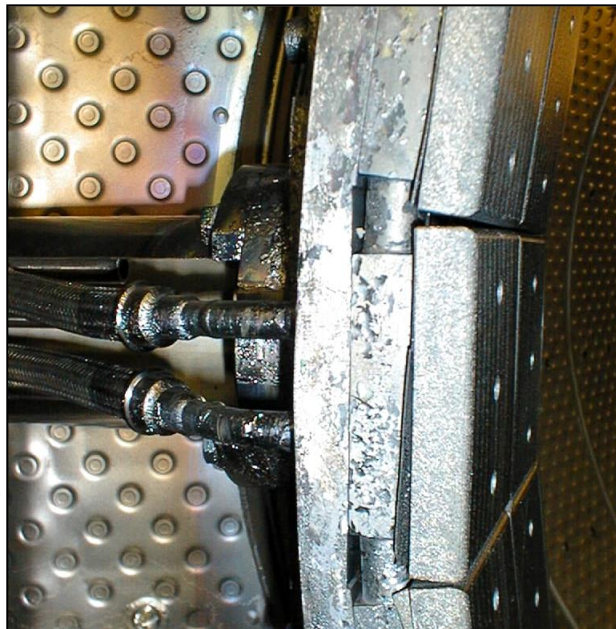
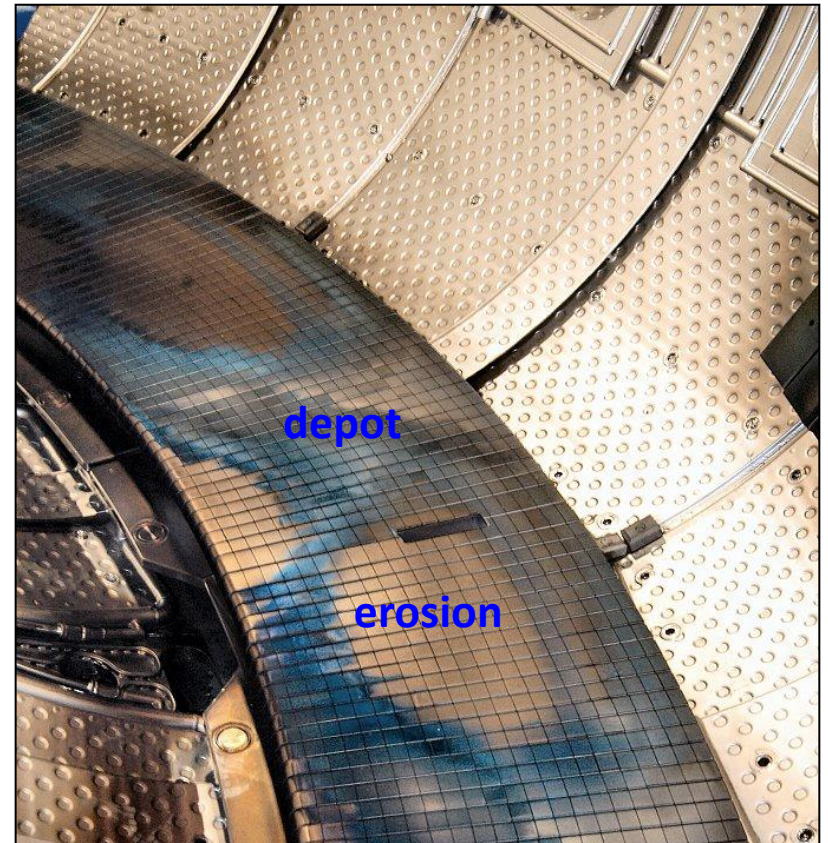
→ Choix des matériaux très important !



# Les composants face au plasma

## Exemple de dégradations de parois face au plasma

Depot, Erosion, Fonte...



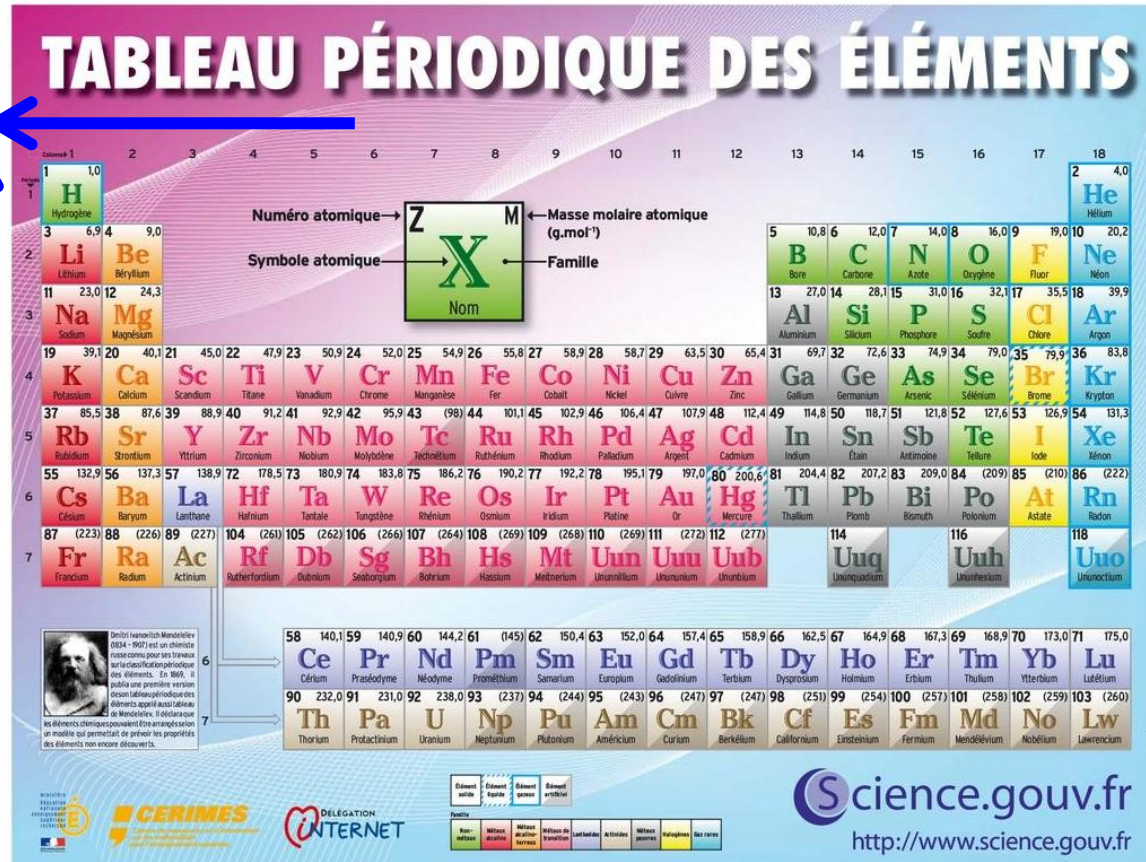


# Les composants face au plasma

## A la recherche du matériau idéal!

#01 : Compatibilité avec le plasma (dilution, rayonnement)	Z faible	

Z faible



# Les composants face au plasma

## A la recherche du matériau idéal!

Elements courants

#01 : Compatibilité avec le plasma (dilution, rayonnement)	Z faible	Li, Be, C ...

### TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

**Numéro atomique** → Z      **Masse molaire atomique (g.mol<sup>-1</sup>)** → M

**Symbole atomique** → X      **Famille** →

**Nom** →

**Éléments courants** (Li, Be, C, N, O, F, Ne, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, La, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Rf, Db, Sg, Bh, Hs, Mt, Uun, Uuu, Uub, Uuq, Uuh, Uuo)

**Éléments non encore découverts** (114, 116, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000)

**Science.gouv.fr**  
<http://www.science.gouv.fr>



# Les composants face au plasma

## A la recherche du matériau idéal!

Elements  
courants

#01 : Compatibilité avec le plasma (dilution, rayonnement)	Z faible	Li, Be, C ...
#02 : Minimiser la pollution du plasma	Taux de pulvérisation faible	

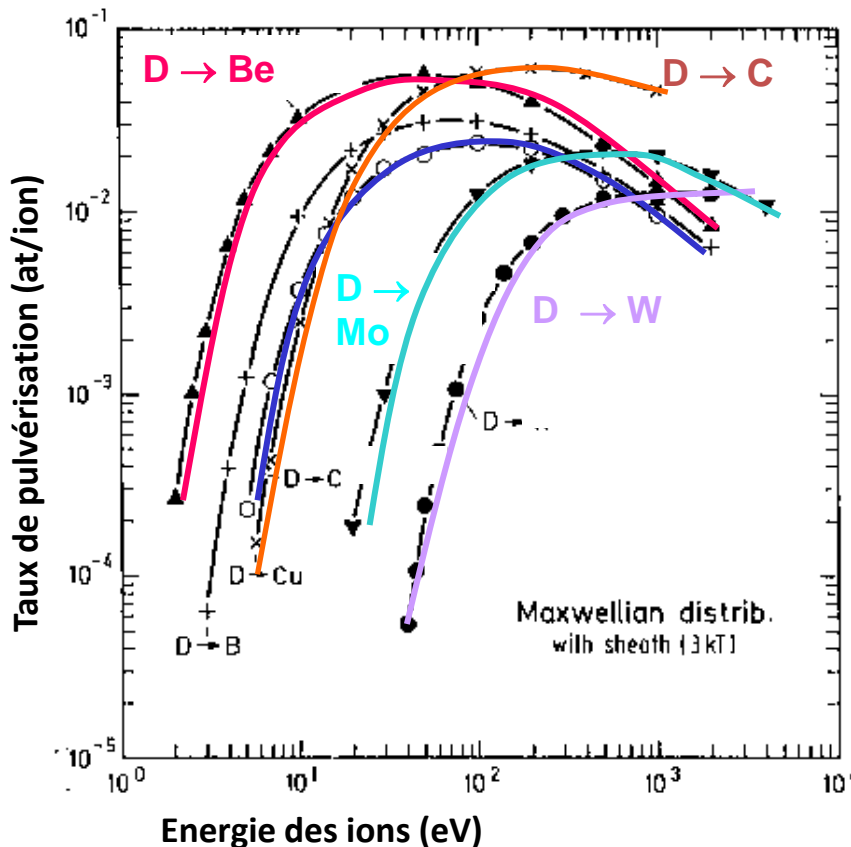


# Les composants face au plasma

## A la recherche du matériau idéal!

Elements  
choisis

#01 : Compatibilité avec le plasma (dilution, rayonnement)	Z faible	Li, Be, C ...	... W ...
#02 : Minimiser la pollution du plasma	Taux de pulvérisation faible	Be (~3 eV), C (~8eV)...	W (~80eV)



$\sim 2-3 \text{ eV} < T_{\text{plasma bord}} < 100 \text{ eV}$   
 $\rightarrow 15 \text{ eV} < E_{\text{ions}} < 500 \text{ eV}$  (gaine)

Seuil: D impact sur **Be 3 eV**  
**C 8 eV**  
**W 80 eV**

Taux de pulvérisation important  
(et stable) pour Be & C à partir  
d'énergies faibles.

W: Pas d'érosion pour des  
énergies faibles

# Les composants face au plasma

## A la recherche du matériau idéal!

Elements  
courants

#01 : Compatibilité avec le plasma (dilution, rayonnement)	<b>Z faible</b>	<b>Li, Be, C ...</b> ... <b>W ...</b>
#02 : Minimiser la pollution du plasma	<b>Taux de pulvérisation faible</b>	<b>Be</b> (~3 eV), <b>C</b> (~8eV)... <b>W</b> (~80eV)
#03: Fonct. Haute température	$T_{\text{Fusion}}$ élevée	<b>Li</b> (180°C), <b>Be</b> (~1280°C), <b>C</b> (~3370°C)... <b>W</b> (~3400°C)
#04 : Refroidissement « facile »	Conductivité thermique élevée	<b>Be</b> (~300W/m.K), <b>C</b> (50-800 W/m.K), <b>W</b> (~180W/m.K)
#05 : Compatibilité chimique (H)	affinité	<b>Be</b> (Ok), <b>C</b> (chimie H !), <b>W</b> (Ok)

+ tenue sous irradiation, tenue au choc thermique (fissuration, propagation...),  
fabricabilité (mise en forme, soudabilité), activation, toxicité...

### 2 stratégies:

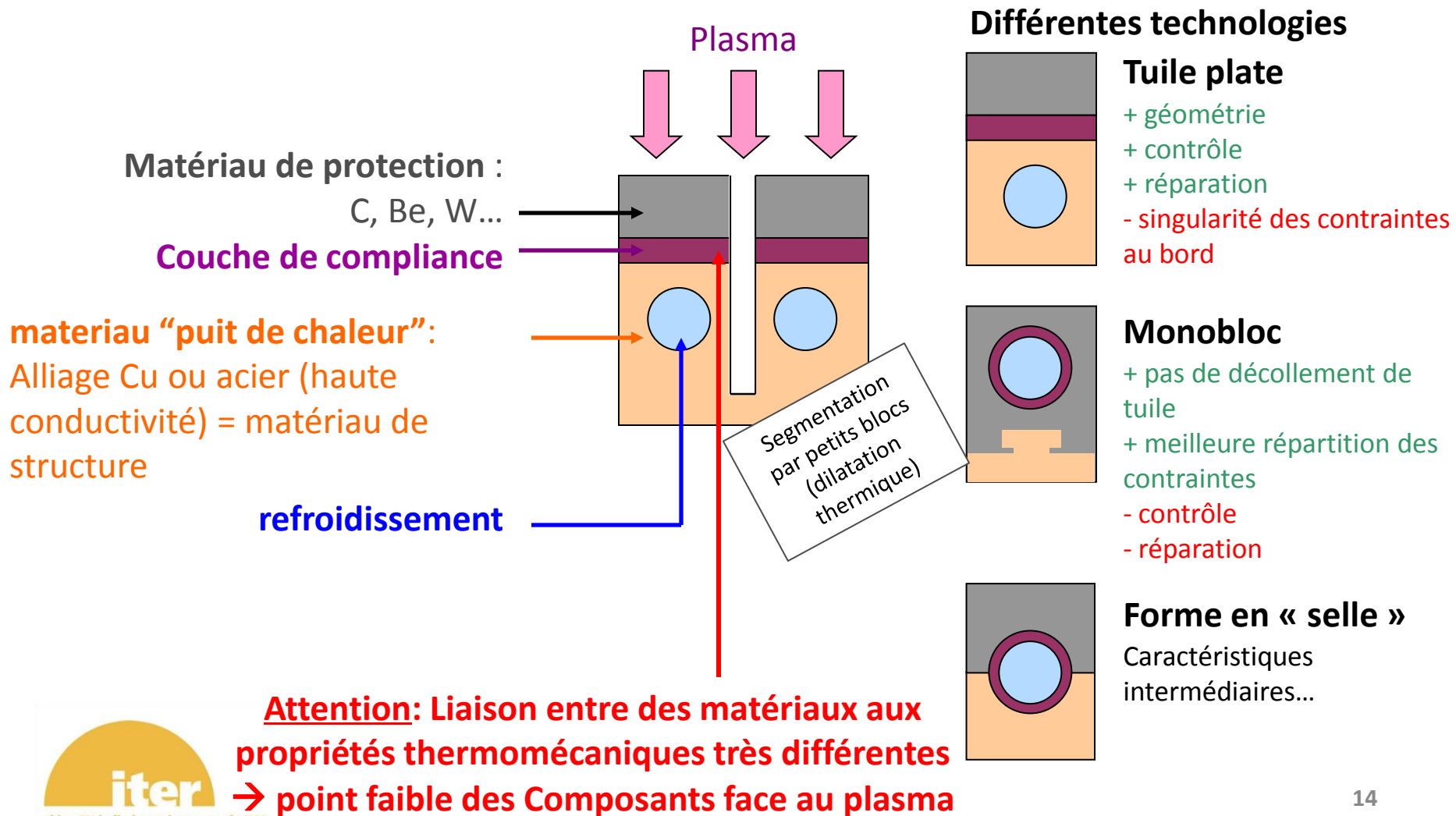
**Optimise les performances plasma**(→ flexibilité avec la physique) → **bas Z** → carbone = matériau idéal (des installations précédentes)

**Optimiser la durée de vie** → **haut Z** → W ? (Optimisation des installations actuelles)

# Les composants face au plasma

## Principes d'un composant face au plasma

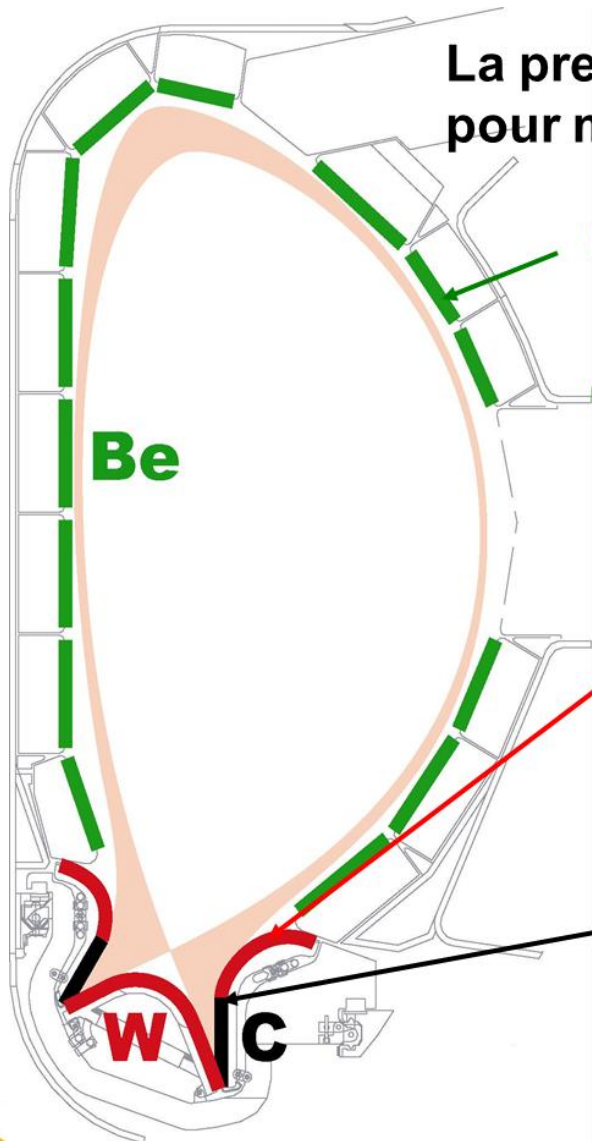
Matériau fonctionnel (CFC, Be, W) + Matériau de structure (acier, Cu, autres?)





# Les composants face au plasma

La première paroi d'ITER : un mixte de matériaux pour minimiser les contraintes sur le plasma



**Be** : ~700 m<sup>2</sup>, flux thermique < 1 MW/m<sup>2</sup>  
+ bas Z, piège à O<sub>2</sub>  
- érosion, procédés fabrication, fusion  
**Optimise les performances plasma**

**W** : 100 m<sup>2</sup>, flux thermique < 5 MW/m<sup>2</sup>  
+ faible érosion, fusion  
- haut Z  
**Optimise la durée de vie**

Attention à la compatibilité plasma !

~~**CFC** : 50 m<sup>2</sup>, flux thermique ~ 10 MW/m<sup>2</sup>  
+ faible Z, pas de fusion (sublimation)  
- piège le T  
**Optimise les hauts flux**~~

**Full W depuis 2013  
(Due à l'affinité C/T & importante érosion)**

CFC: Chloro-Fluoro-Carbone

## Quels choix pour un réacteur?

Des flux thermiques proches de ceux d'ITER mais des contraintes supplémentaires :

1 – Refroidir mais pour produire de l'énergie

→ T de sortie réfrigérant élevée

2 – Une compatibilité avec les conditions de bord d'un plasma de réacteur (taux d'érosion...)

3 – Des critères de sûreté à respecter (inventaire tritium...)

4 – Durée de vie sous irradiation neutronique

~~H<sub>2</sub>O~~   He   Métal liquide

~~Be~~   W   ~~C~~   autres

Be   W   ~~C~~   autres

Be ?   W ?   C ?   autres ?

A ce jour, le tungstène comme matériau de première paroi est probablement le meilleur choix (« le moins mauvais » voire « le seul » ?)

## Bilan des Composants Face Plasma

**Technologie actuelle :** Tore Supra, tuiles CFC, H<sub>2</sub>O, 10MW/m<sup>2</sup> **Validée**

→ **WEST : Full W**

**Technologie ITER : W, Be, CFC : 10-20 MW/m<sup>2</sup>, H<sub>2</sub>O**

De nombreux concepts (Be, CFC, W) et technologies (brasage, soudage...) **testés avec succès en LABORATOIRE.**

**mais** de la R&D est encore nécessaire pour **améliorer la fiabilité de fabrication** (→ passage à l'échelle industrielle)

**Technologie réacteur :**

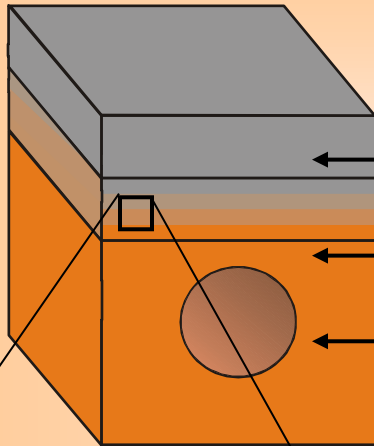
Pas de solution optimale actuellement →

**Un important programme de R&D est nécessaire pour atteindre le niveau de crédibilité requis**



## Bilan des Composants Face Plasma

Ex de R&D (CEA/CNRS): Assemblage par gradient de fonction

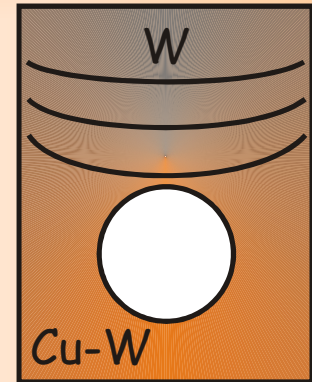


Tungstène pur

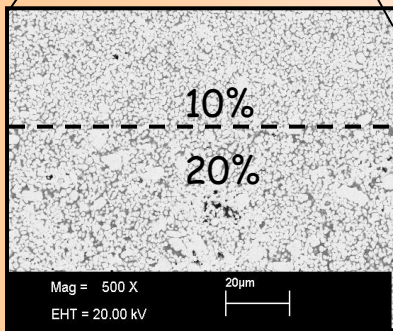
Composition variable

Cuivre tungstène

*Propriétés comparables à celles du CuCrZr,*  
• Conductivité thermique excellente  
• Tenue mécanique très supérieure à celle du cuivre doux



Possibilité de piloter le gradient de manière à homogénéiser le flux thermique à la paroi de la canalisation d'eau



Collaboration CEA  
et

CNRS  
UMR  
5266

INP Grenoble

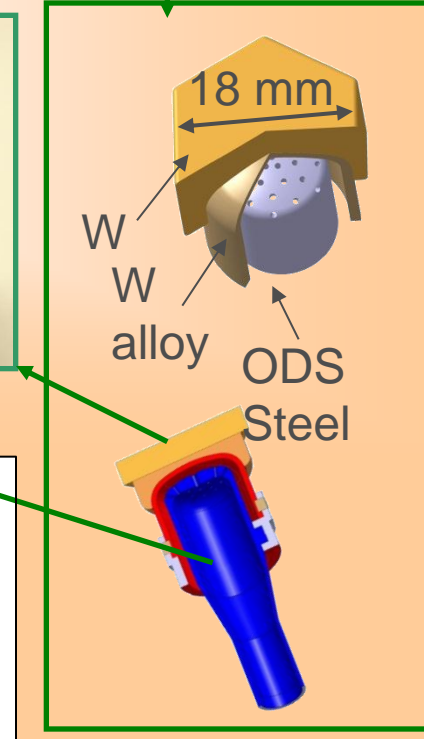
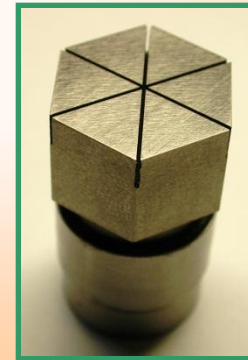
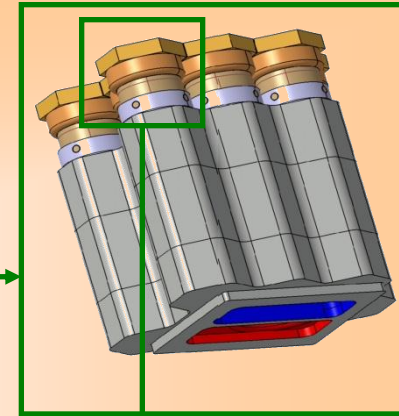
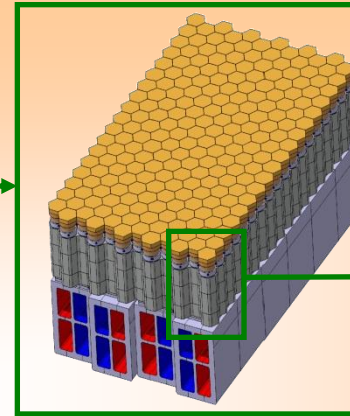
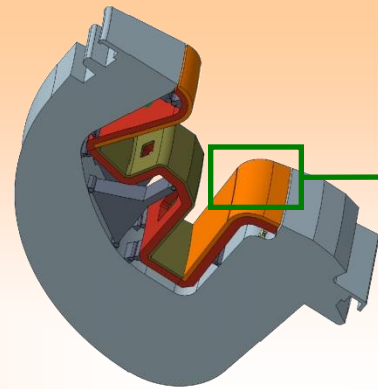
SIMaP

**Un important programme de R&D est nécessaire pour atteindre le niveau de crédibilité requis**

# Les composants face au plasma

Exemple de R&D en  
vue du réacteur

Divertor W refroidi He  
10MW/m<sup>2</sup>

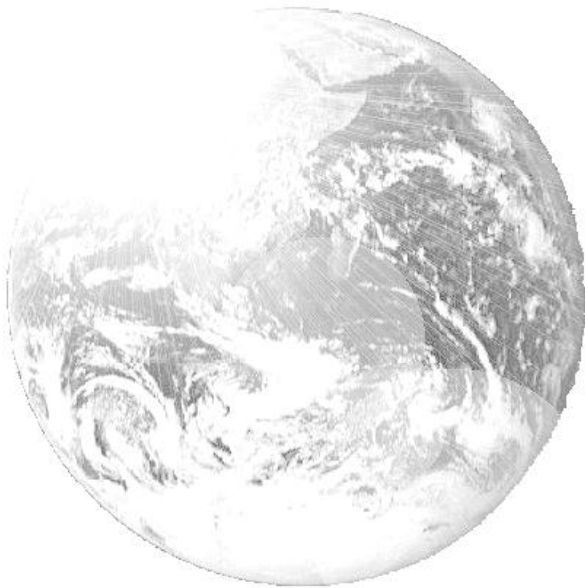


Un important programme de R&D est nécessaire  
pour atteindre le niveau de crédibilité requis

## Principes de la couverture tritigène

Matériau fonctionnel (Li, Be...) + Matériau de structure (acier, autre?)

Rappels: Conditions de base de la fusion nucléaire sur terre



- gaz rare,
- particule chargée: confinée par le champ magnétique
- emporte 3.6MeV: chauffe le plasma

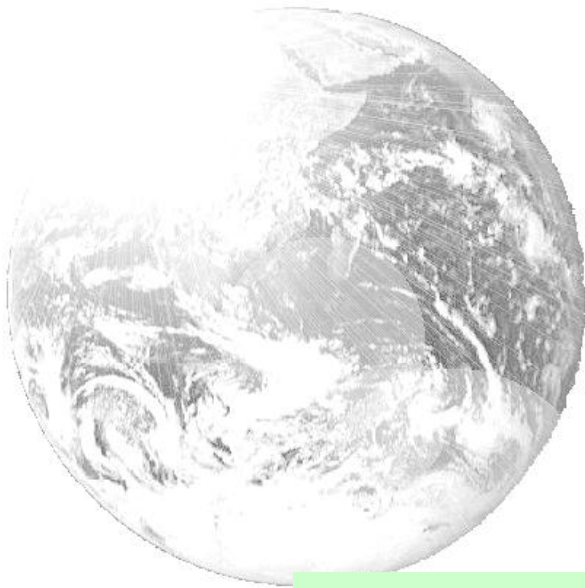
- particule neutre: sort du plasma
- Emporte 14MeV



## Principes de la couverture tritigène

Matériau fonctionnel (Li, Be...) + Matériau de structure (acier, autre?)

Rappels: Conditions de base de la fusion nucléaire sur terre



**Tritium** : Existe en très faible quantité (1T pour  $10^{17}$  H),  
Radioactif ( $\beta^-$  5.7 keV,  $T_{1/2}=12.3$  ans,  $T_{\text{biologique}}=10$ j)

- production d'origine naturelle :
- production d'origine humaine :
  - rejets essais nucléaires atmosphériques
  - rejet des réacteurs de fission PWR
  - réacteurs civils à eau lourde

(inventaire ~ 18.5 kg)

Consommation ITER → 17.5 kg pendant sa vie

Consommation REACTEUR 1000 MWe → 150 kg / an

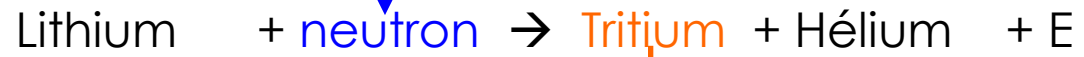
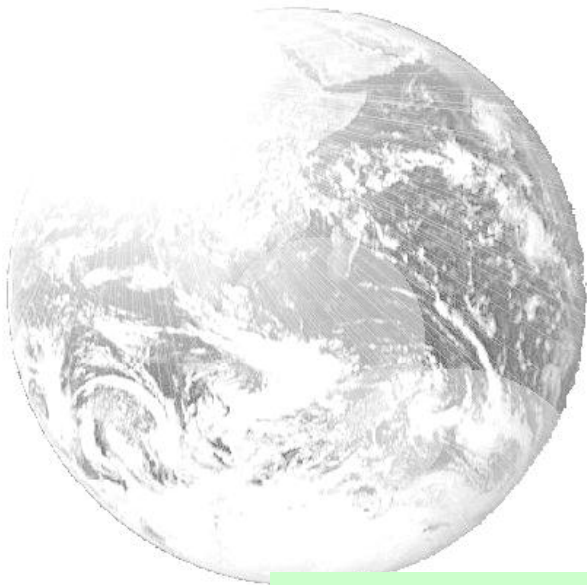
→ **production indispensable**

Le **deutérium** peut être extrait de l'eau de mer (ressources supérieures à la durée de vie du soleil)

## Principes de la couverture tritigène

Matériau fonctionnel (Li, Be...) + Matériau de structure (acier, autre?)

Rappels: Conditions de base de la fusion nucléaire sur terre



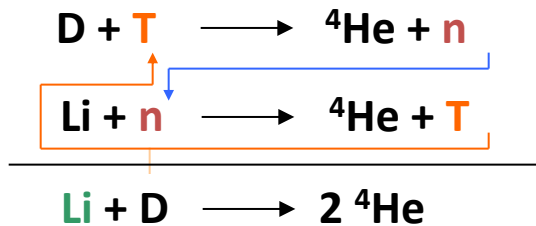
Le **deutérium** peut être extrait de l'eau de mer (ressources supérieures à la durée de vie du soleil)

Le **lithium** terrestre est plus abondant que l'étain ou le plomb et même dix fois plus abondant que l'uranium.

Le lithium peut aussi être tiré de l'eau de mer (0.17g/m<sup>3</sup>).

Les ressources en lithium terrestre sont estimées à quelques milliers d'années. Cette limite est repoussée à plusieurs **millions d'années** si le lithium est tiré de l'eau de mer.

## Principes de la couverture tritigène



- 3 FONCTIONS :**
1. Production de tritium
  2. Récupération de l'énergie du neutron de 14MeV
  3. Protection des composants (aimants) du neutron de 14MeV

DONC : Couverture tritigène, c'est un composant formé :

- de  ${}^6\text{Li}$  ou du  $\text{Li}_{\text{nat}}$ , sous forme liquide (LiPb) ou solide (céramique : ex  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ )
- obligation d'utiliser un multiplicateur de neutrons (ex : Pb ou Be)
- un réfrigérant (eau, gaz, autres...)
- **un matériau de structure...**



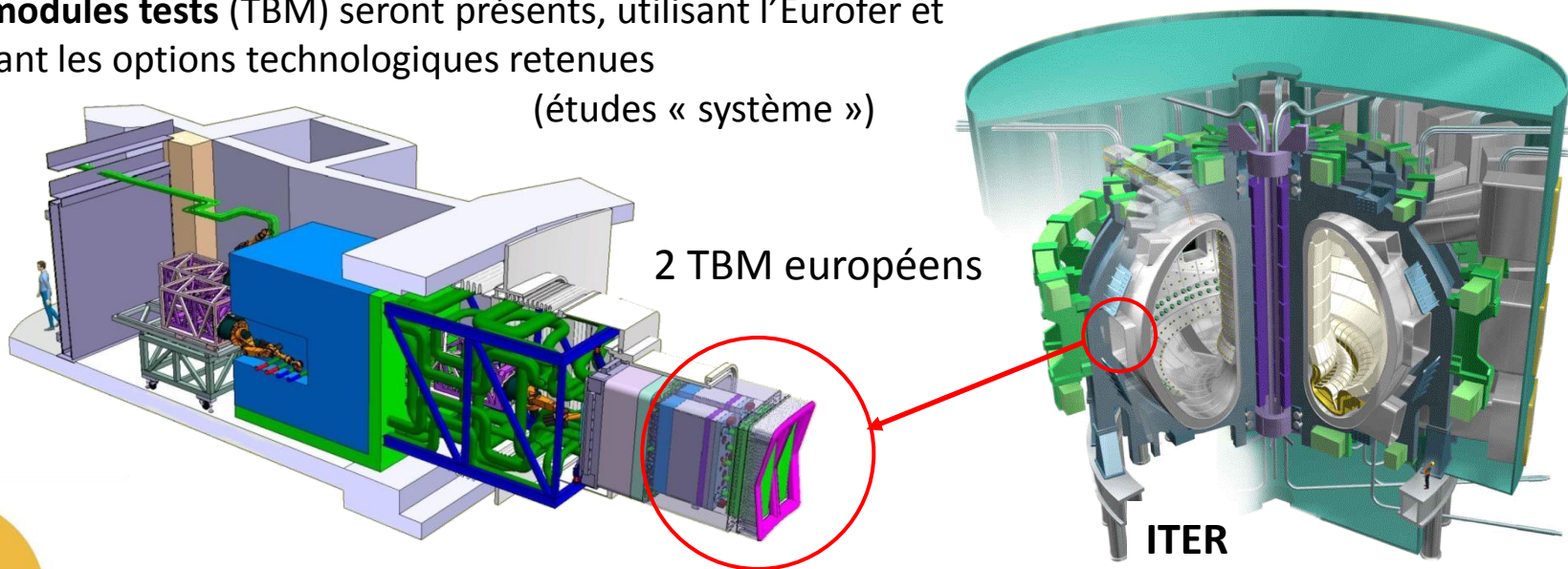
## Bilan de la couverture tritigène

### Actuellement :

- La possibilité de produire « in-situ » le tritium dans un réacteur est démontrée dans différents concepts par des calculs 3D
- De la R&D est en cours pour :
  - valider de façon expérimentale les points durs (fabrication)
  - la mise au point des matériaux de structure

### ITER, utilise de l'acier 316L et ne possède pas de couverture tritigène mais...

des **modules tests** (TBM) seront présents, utilisant l'Eurofer et validant les options technologiques retenues (études « système »)



## Bilan de la couverture tritigène

### Actuellement :

- La possibilité de produire « in-situ » le tritium dans un réacteur est démontrée dans différents concepts par des calculs 3D
- De la R&D est en cours pour :
  - valider de façon expérimentale les points durs (fabrication)
  - la mise au point des matériaux de structure

### ITER, utilise de l'acier 316L et ne possède pas de couverture tritigène mais...

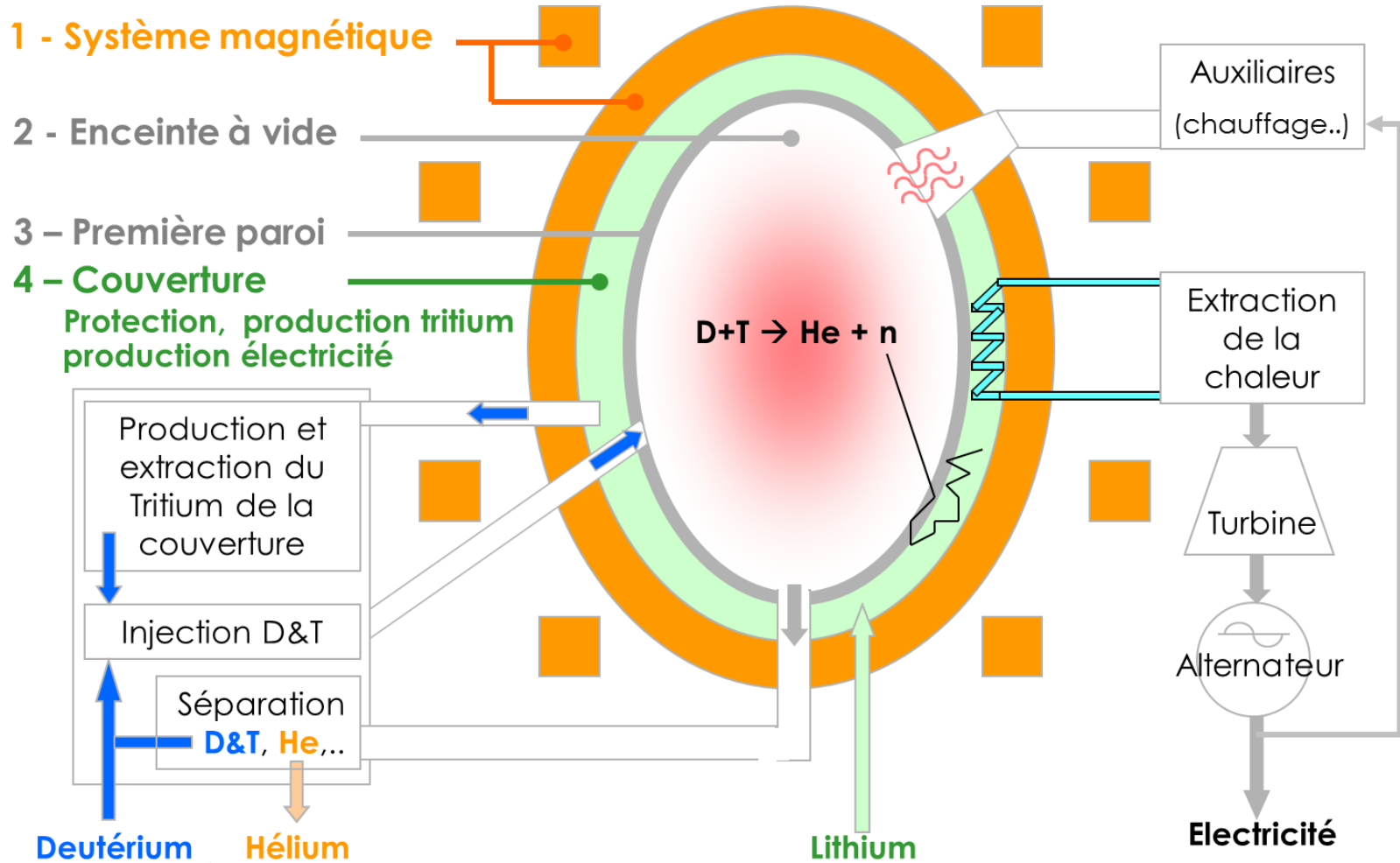
des **modules tests** (TBM) seront présents, utilisant l'Eurofer et validant les options technologiques retenues (études « système »)

### Projet en parallèle d'ITER.

La validation **expérimentale de la tenue des matériaux de structure aux neutrons de 14 MeV (effet He, H) est impérative** → programme de modélisation + une source de neutrons de 14MeV

IFMIF International Fusion Materials Irradiation Facility /  
Canon à neutron qui sera construit au Japon

## ITER vs REACTEUR





## ITER vs REACTEUR

1 - Système magnétique

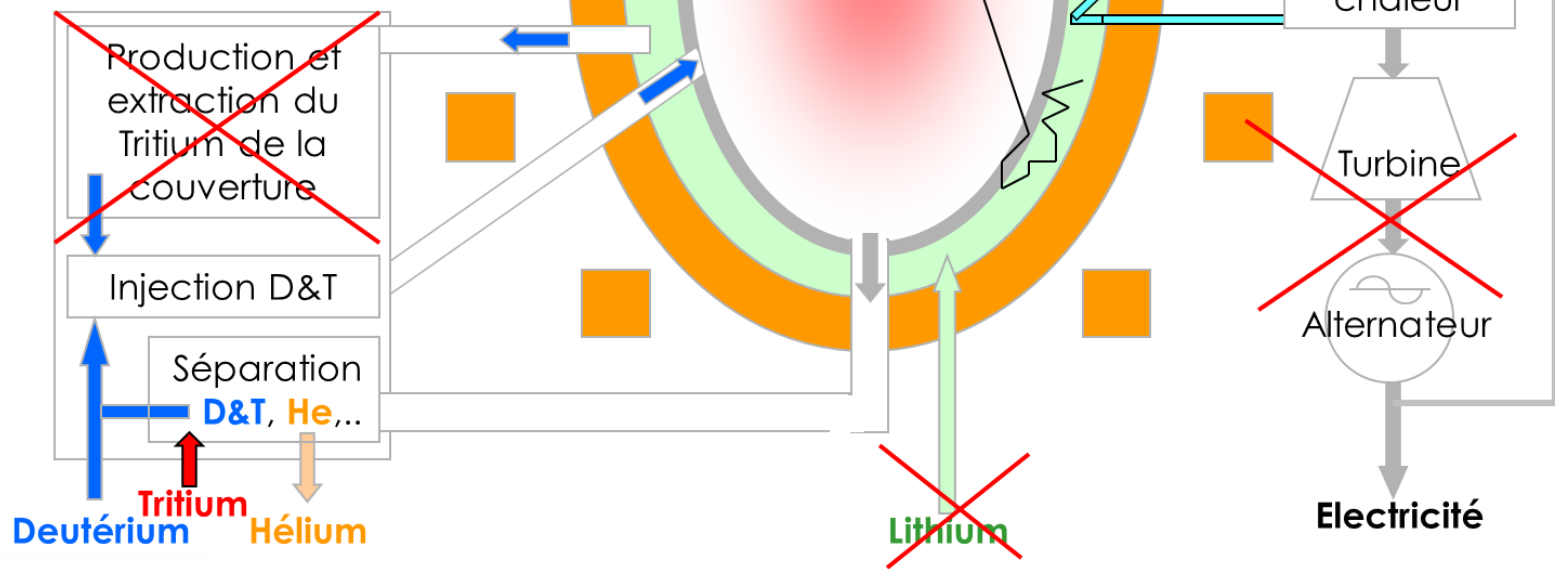
2 - Enceinte à vide

3 - Première paroi

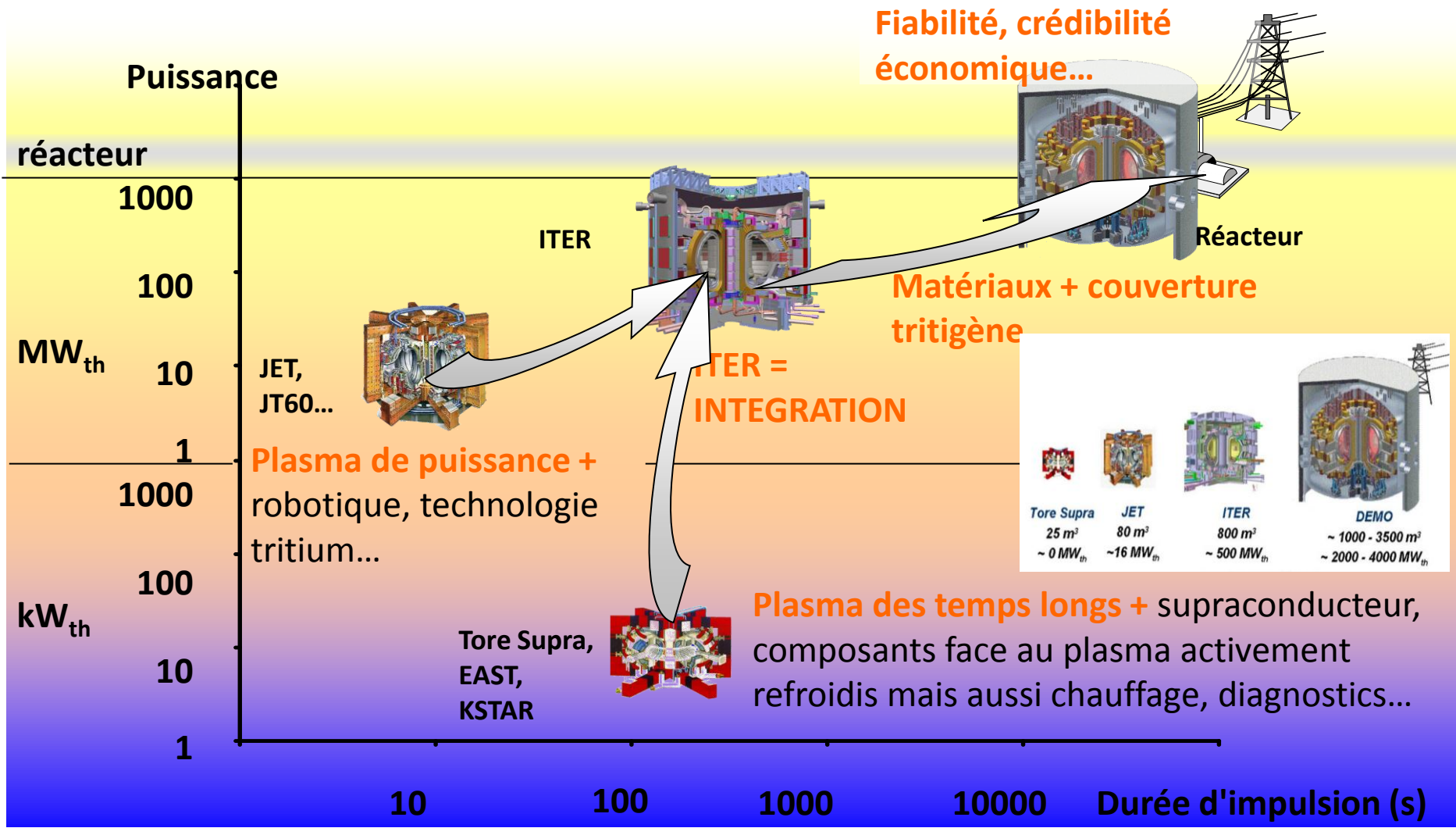
4 - Couverture

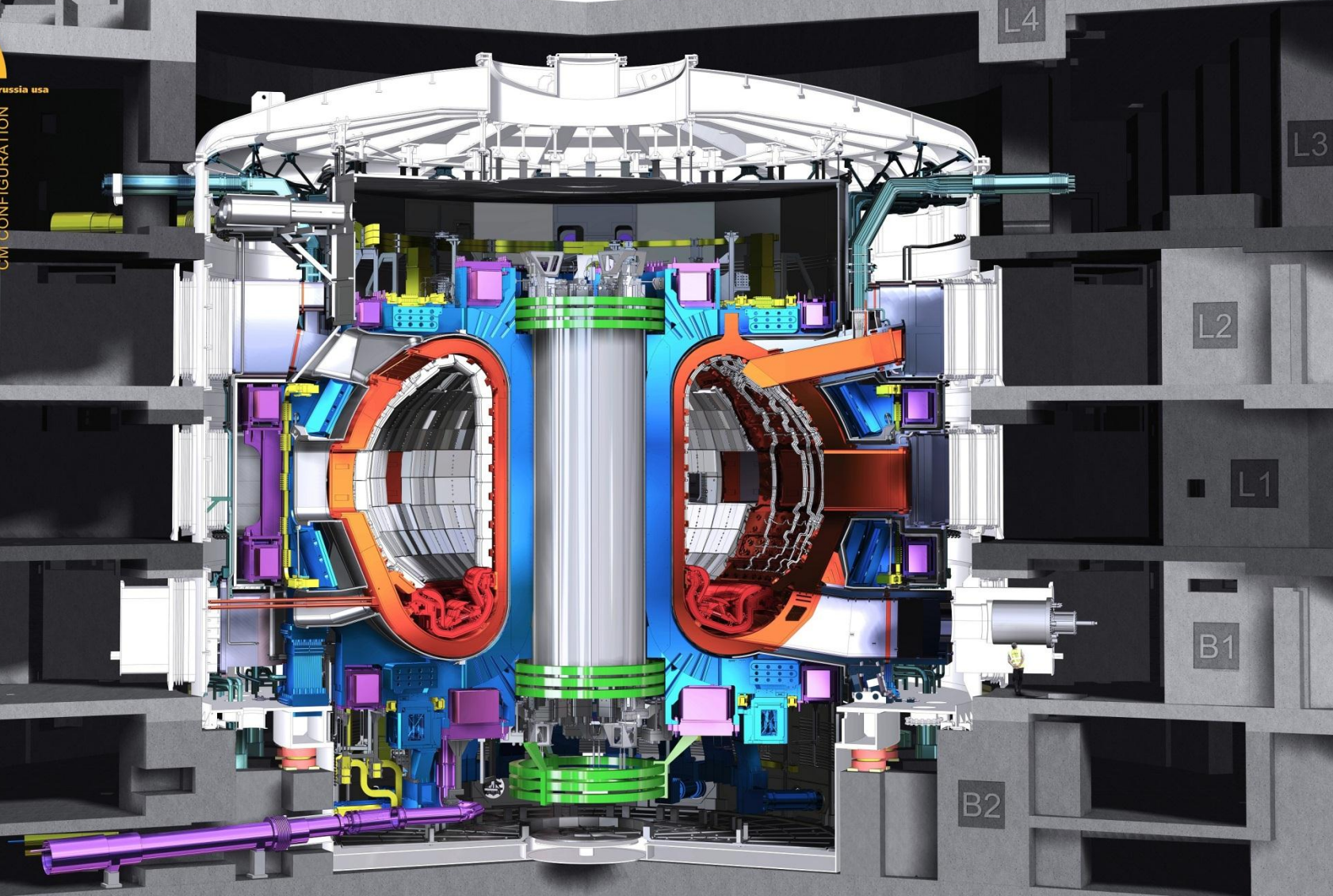
Protection, ~~production tritium~~  
~~production électricité~~

**ITER : pas de production  
de tritium ni électricité**



# ITER vs. Reacteur





[jean-marc.martinez@iter.org](mailto:jean-marc.martinez@iter.org)

**Merci pour votre attention**  
**Questions / Débats**