



# L'énergie nucléaire, hier, aujourd'hui et demain

**Michel Simon**

**Société Française d'Énergie Nucléaire**

**13 novembre 2020**



# L'énergie nucléaire

## Hier, aujourd'hui, demain

- **La structure de la matière**  
*Les balbutiements de la recherche*
- **La fission de l'atome et la réaction en chaîne**
- **Les premiers développements**  
*... où l'histoire scientifique se mêle à l'Histoire.*
- **Les réacteurs électrogènes**  
*de G1 à l'EPR*
- **Les réacteurs du futur**
  - *Les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération*
  - *Les petits réacteurs modulaires*
- **La fusion : L'énergie du soleil au service de l'humanité ?**

# 1789 : une révolution?

- ❖ **Martin Heinrich KLAPROTH découvre deux nouveaux éléments:**
  - **l'Uranium (sous forme d'oxyde)**
    - **Sous-produit d'une mine d'argent**
    - **Pechblende ~ « minerai poisseux »**
    - **L'Uranium métal ne sera isolé en qu'en 1841**
  - **Le Zirconium**
  
- ❖ **Lavoisier publie son « *Traité élémentaire de Chimie* »**



# La classification des éléments

## Dmitri Mendeleïev - 1869

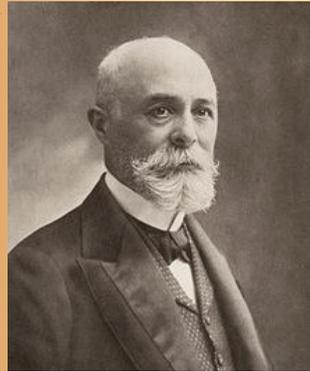
**TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS**



1 <b>H</b> HYDROGÈNE 1,0079																	2 <b>He</b> Hélium 4,0026
3 <b>Li</b> LITHIUM 6,941	4 <b>Be</b> Béryllium 9,0122											5 <b>B</b> Bore 10,811	6 <b>C</b> Carbone 12,011	7 <b>N</b> Azote 14,007	8 <b>O</b> Oxygène 15,999	9 <b>F</b> Fluorine 18,998	10 <b>Ne</b> Néon 20,1797
11 <b>Na</b> Sodium 22,989	12 <b>Mg</b> Magnésium 24,305											13 <b>Al</b> Aluminium 26,981	14 <b>Si</b> Silicium 28,085	15 <b>P</b> Phosphore 30,974	16 <b>S</b> Sulfure 32,066	17 <b>Cl</b> Chlore 35,453	18 <b>Ar</b> Argon 39,948
19 <b>K</b> Potassium 39,098	20 <b>Ca</b> Calcium 40,078	21 <b>Sc</b> Scandium 44,955	22 <b>Ti</b> Titane 47,867	23 <b>V</b> Vanadium 50,9415	24 <b>Cr</b> Chrome 51,9961	25 <b>Mn</b> Manganèse 54,938	26 <b>Fe</b> Fer 55,845	27 <b>Co</b> Cobalt 58,933	28 <b>Ni</b> Nickel 58,6934	29 <b>Cu</b> Cuivre 63,546	30 <b>Zn</b> Zinc 65,38	31 <b>Ga</b> Gallium 69,723	32 <b>Ge</b> Germanium 72,63	33 <b>As</b> Arsenic 74,921	34 <b>Se</b> Sélénium 78,971	35 <b>Br</b> Bromine 79,904	36 <b>Kr</b> Krypton 83,798
37 <b>Rb</b> Rubidium 85,467	38 <b>Sr</b> Strontium 87,62	39 <b>Y</b> Yttrium 88,9058	40 <b>Zr</b> Zirconium 91,224	41 <b>Nb</b> Niobium 92,9063	42 <b>Mo</b> Molybdène 95,95	43 <b>Tc</b> Technétium (98)	44 <b>Ru</b> Ruthénium 101,07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102,90	46 <b>Pd</b> Palladium 106,42	47 <b>Ag</b> Argent 107,8682	48 <b>Cd</b> Cadmium 112,414	49 <b>In</b> Indium 114,818	50 <b>Sn</b> Étain 118,710	51 <b>Sb</b> Antimoine 121,760	52 <b>Te</b> Tellure 127,60	53 <b>I</b> Iode 126,90	54 <b>Xe</b> Xénon 131,293
55 <b>Cs</b> Césium 132,905	56 <b>Ba</b> Baryum 137,327	57-71*	72 <b>Hf</b> Hafnium 178,49	73 <b>Ta</b> Tantale 180,94	74 <b>W</b> Tungstène 183,84	75 <b>Re</b> Rhénium 186,207	76 <b>Os</b> Osmium 190,23	77 <b>Ir</b> Iridium 192,217	78 <b>Pt</b> Platine 195,084	79 <b>Au</b> Or 196,96	80 <b>Hg</b> Mercure 200,59	81 <b>Tl</b> Thallium 204,38	82 <b>Pb</b> Plomb 207,2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208,98	84 <b>Po</b> Polonium (209)	85 <b>At</b> Astatine (210)	86 <b>Rn</b> Radon (222)
87 <b>Fr</b> Francium (223)	88 <b>Ra</b> Radium (226)	89 <b>Ac</b> Actinium (227)	90 <b>Th</b> Thorium 232,0377	91 <b>Pa</b> Protactinium 231,03	92 <b>U</b> Uranium 238,02												
			57 * <b>La</b> Lanthane 138,90	58 <b>Ce</b> Cérium 140,116	59 <b>Pr</b> Praseodyme 140,90	60 <b>Nd</b> Néodyme 144,242	61 <b>Pm</b> Prométhium (145)	62 <b>Sm</b> Samarium 150,36	63 <b>Eu</b> Europium 151,964	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157,25	65 <b>Tb</b> Terbium 158,92	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162,500	67 <b>Ho</b> Holmium 164,93	68 <b>Er</b> Erbium 167,259	69 <b>Tm</b> Thulium 168,93	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173,054	71 <b>Lu</b> Lutécium 174,9668



# La radioactivité naturelle



**Travaux sur la photoluminescence de sels d'uranium  
1896 : Découverte « par hasard »  
par Henri Becquerel  
d'un phénomène nouveau : rayons uraniques**

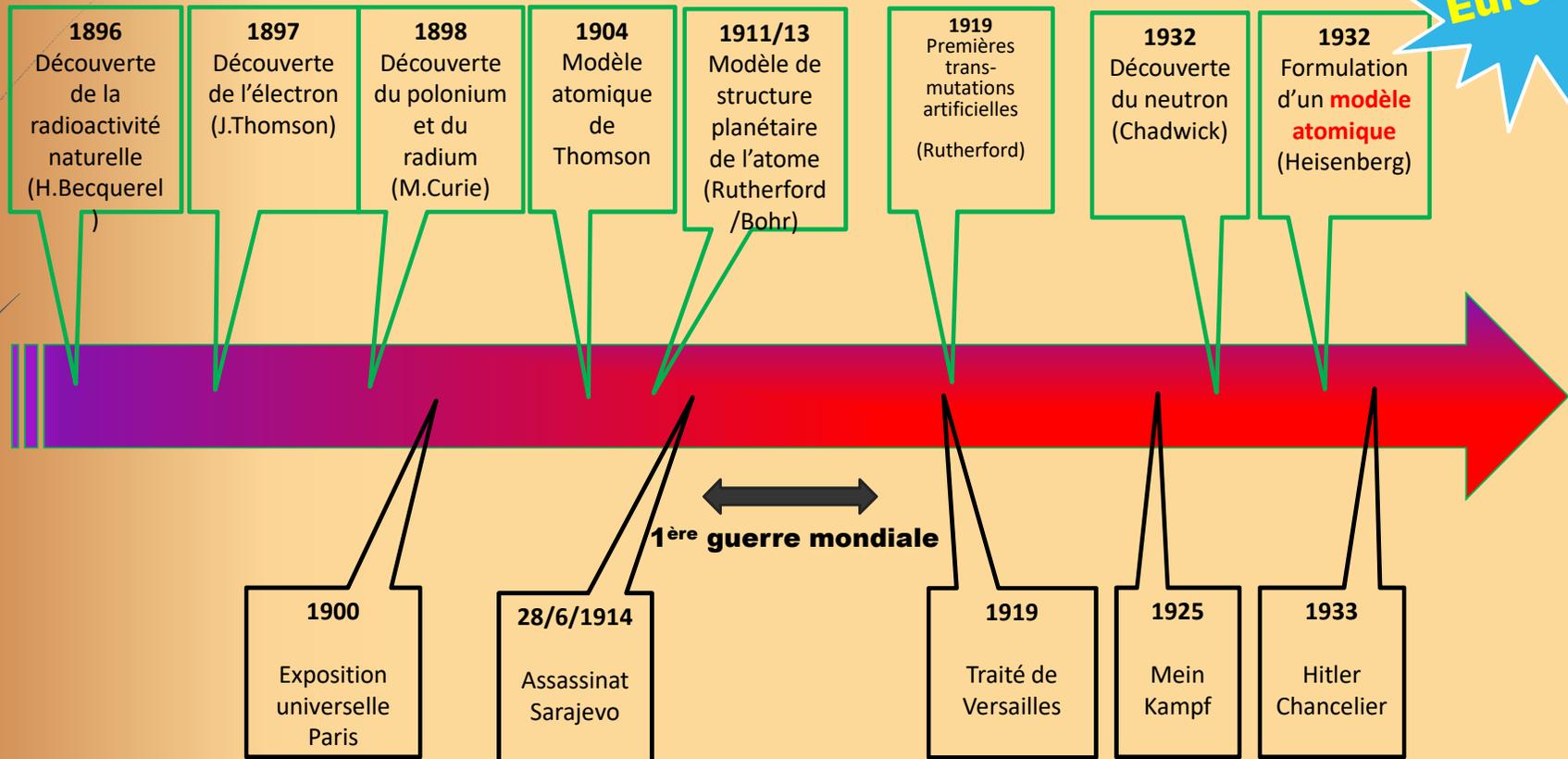
**1897 : Marie Curie-Sklodowska, physicienne et  
chimiste de génie, prépare sa thèse de doctorat sur les  
rayons uraniques avec H.Poincaré**

**1898 : Découverte du Polonium et du Radium  
par Pierre et Marie Curie**

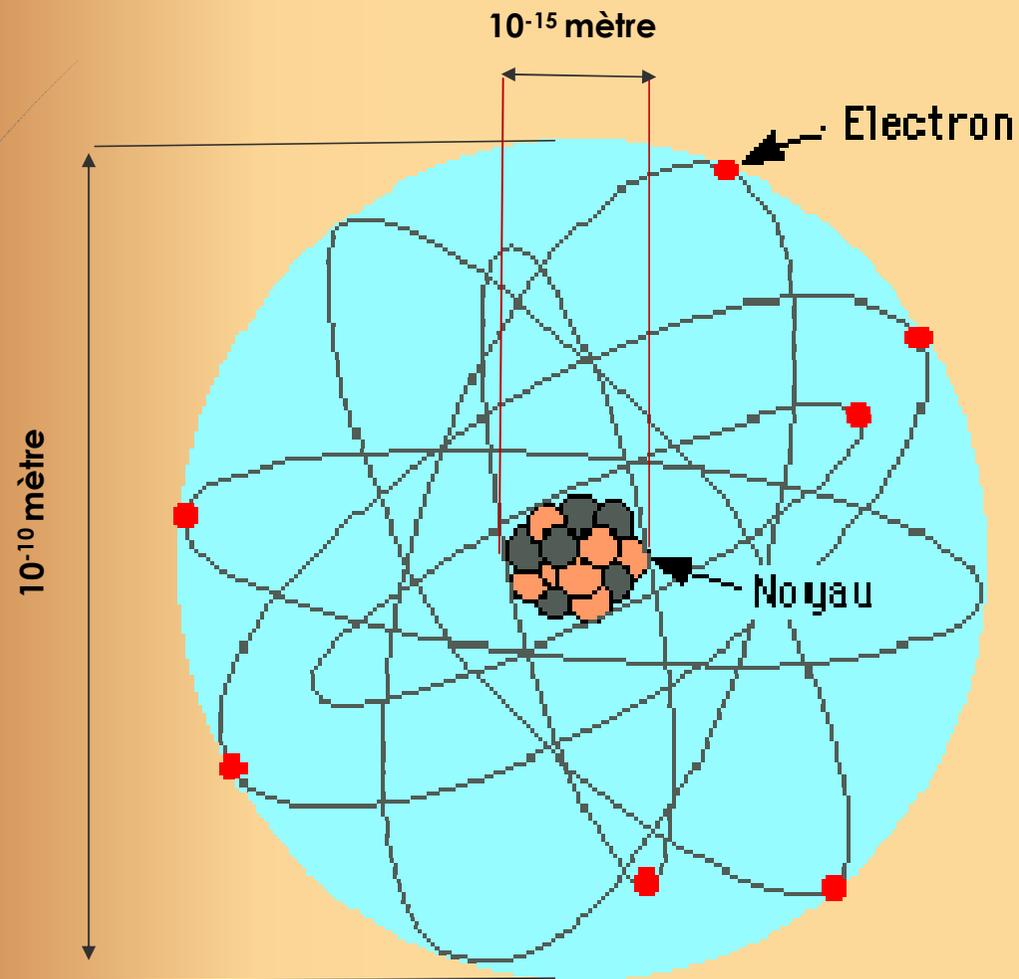


# Structure de la matière

## *L'époque de la recherche*



# Structure de la matière



Nombre de nucléons  
(= protons + neutrons)

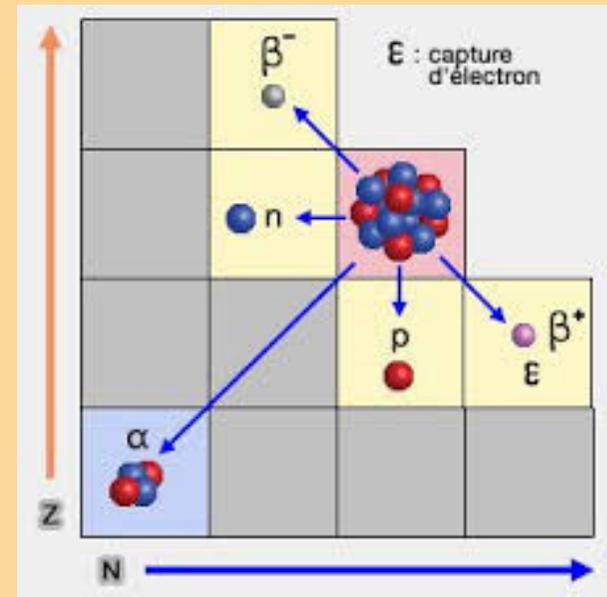
A

X

Symbole de l'élément  
(par ex : H / C / Fe / etc.)

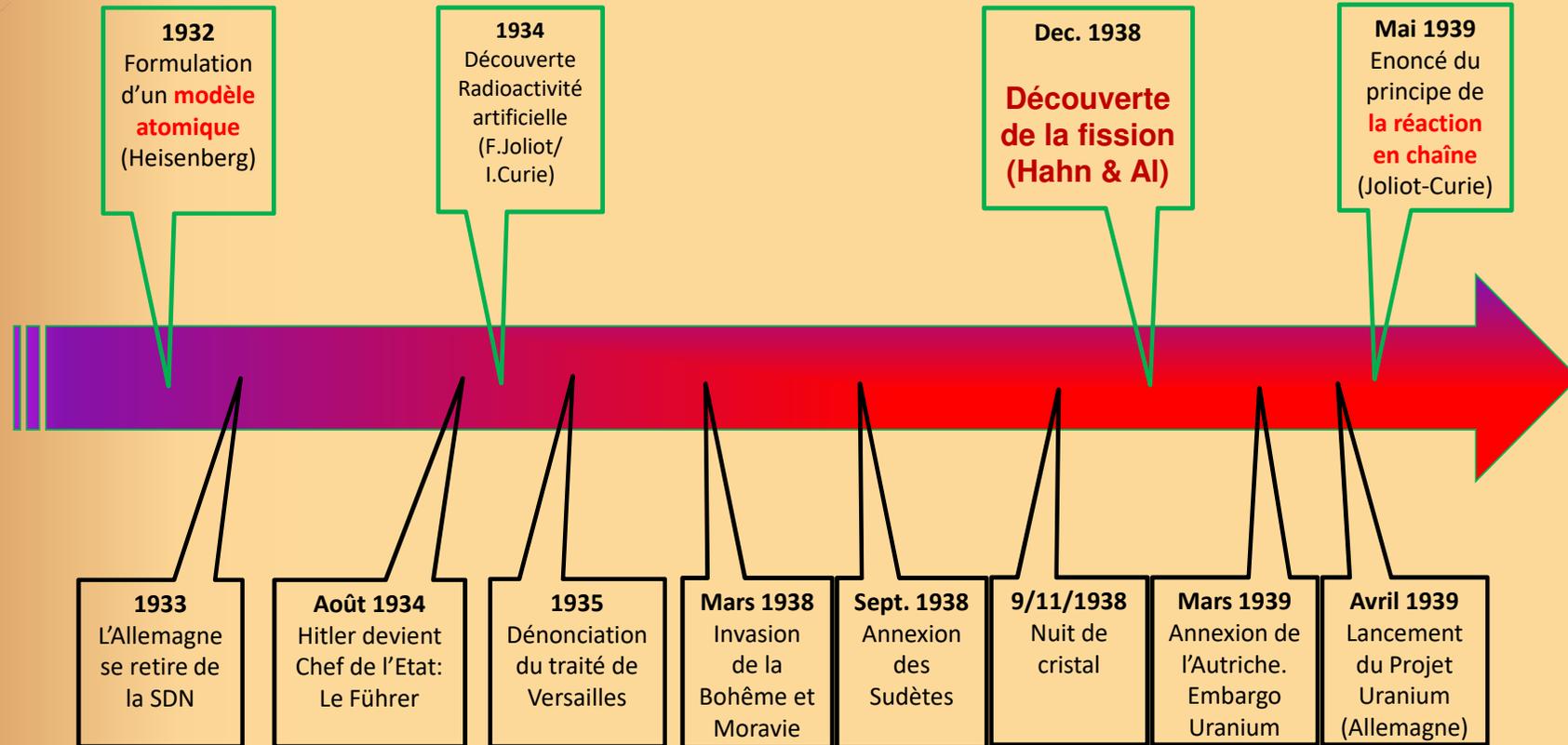
Numéro atomique  
(= nombre de protons)

Z



# La recherche continue...

## *La fission et la réaction en chaîne*



# La recherche continue...

## *La fission et la réaction en chaîne*



### L'atome d'uranium:

- **92 protons (143 neutrons pour l'U235)**
- **3 isotopes naturels:**
  - ✓ **U234 - demi vie : 245500 années**
  - ✓ **U235 - demi vie : 700 millions d'années**
  - ✓ **U238 - demi vie : 4,5 Milliards d'années**
- **23 autres isotopes artificiels**
- **L'U235 est le seul élément naturel fissile**  
*(par choc avec des neutrons thermiques)*
- **L'U238 est fissible,**  
*(par choc avec des neutrons rapides)*

Concentration  
dans l'U naturel

**0,0056%**

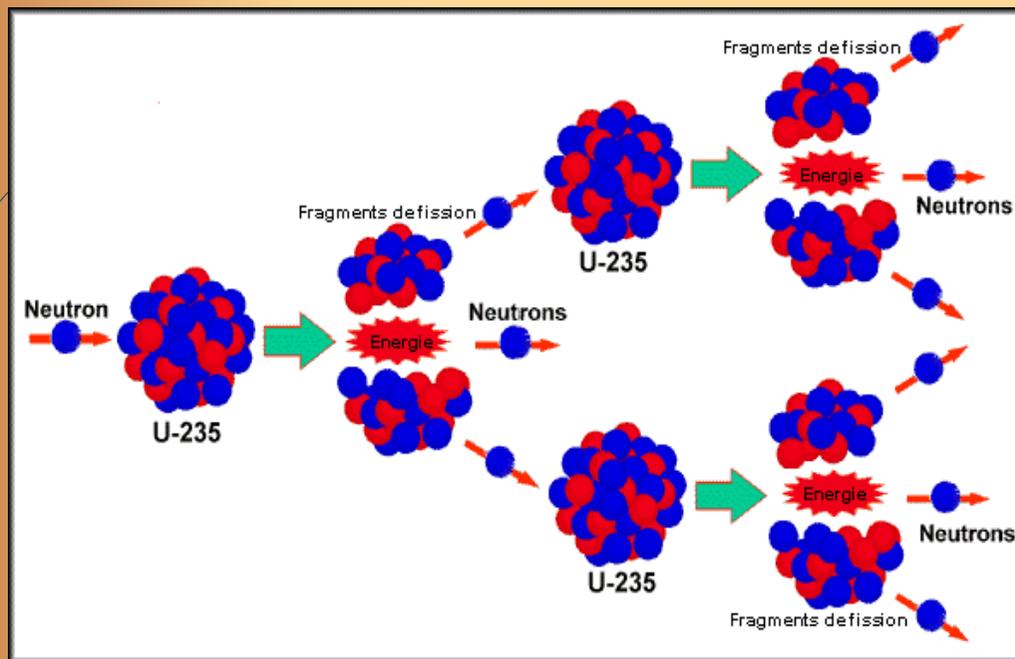
**0,72%**

**99,28%**

# La recherche continue...

## *La fission et la réaction en chaîne*

### *La réaction en chaîne*



❖ **DÉCOUVERTE EN MAI 1939  
PAR F.JOLIOT-CURIE**

❖ **DÉGAGEMENT MASSIF  
D'ÉNERGIE:**

- **APPLIC. EXPLOSIVES:  
CONCENTRER LES ATOMES  
FISSILES**
- **APPLIC. INDUSTRIELLES:  
MAÎTRISER LE FLUX DES  
NEUTRONS**

# La recherche continue...

## La fission et la réaction en chaîne

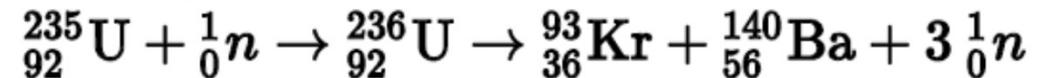
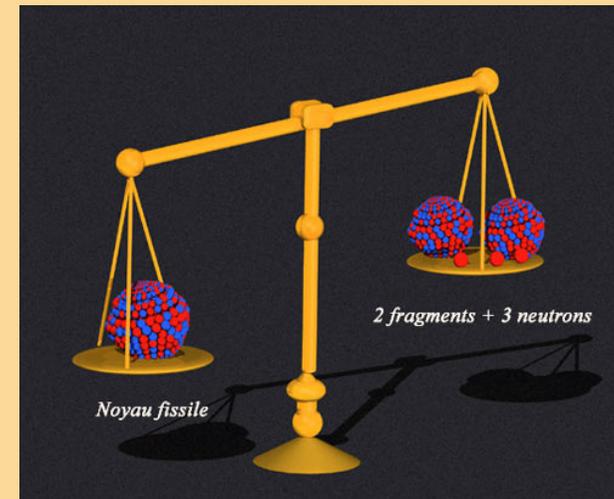
### LA FISSION DE L'U235

- 2 PRODUITS DE FISSION
- 2 OU 3 NEUTRONS

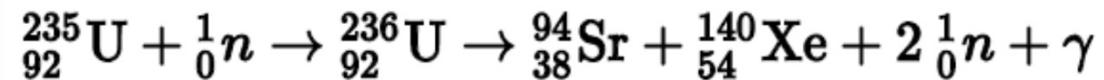
ECART DE MASSE: 0,2%

➔ LIBÉRATION D'UNE ÉNERGIE  
IMPORTANTE,

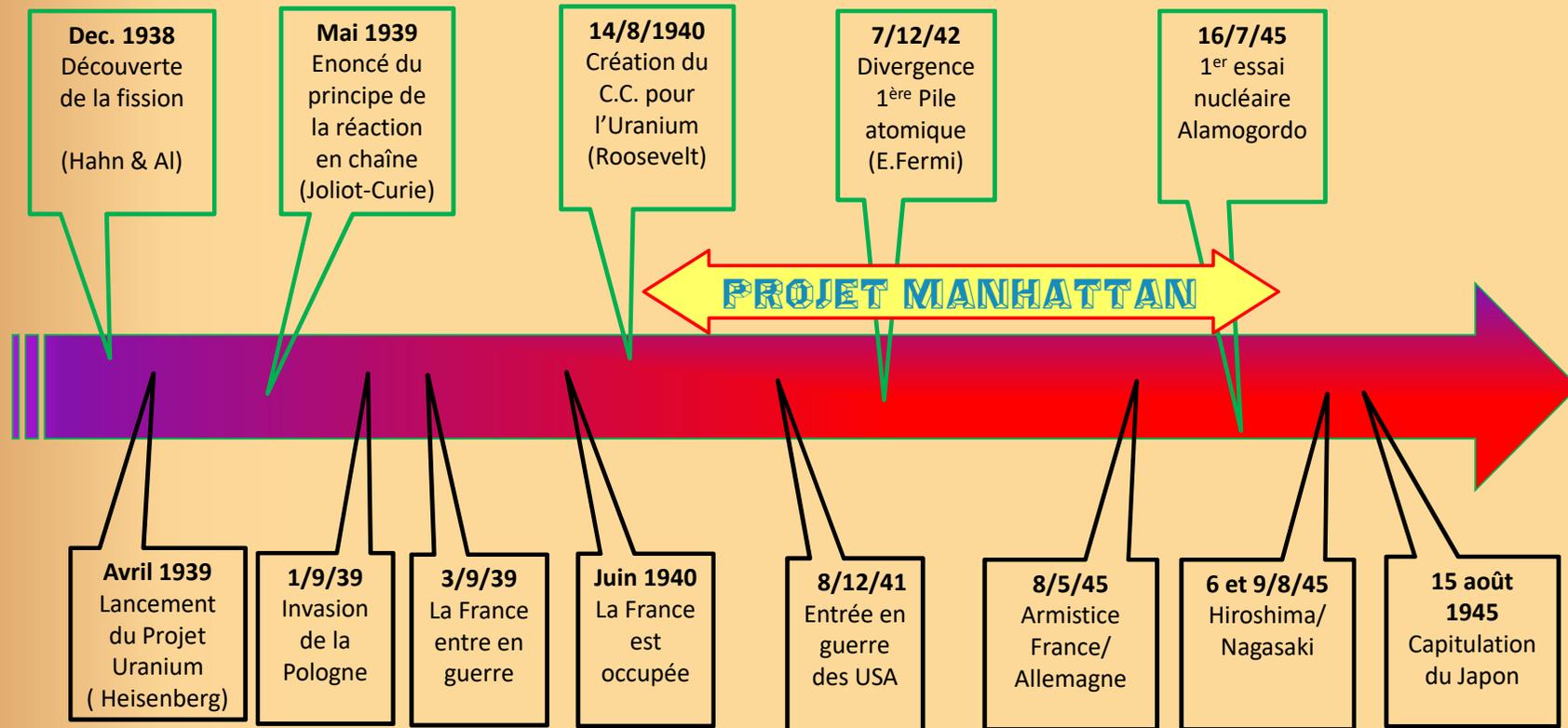
CAR  $E = MC^2$



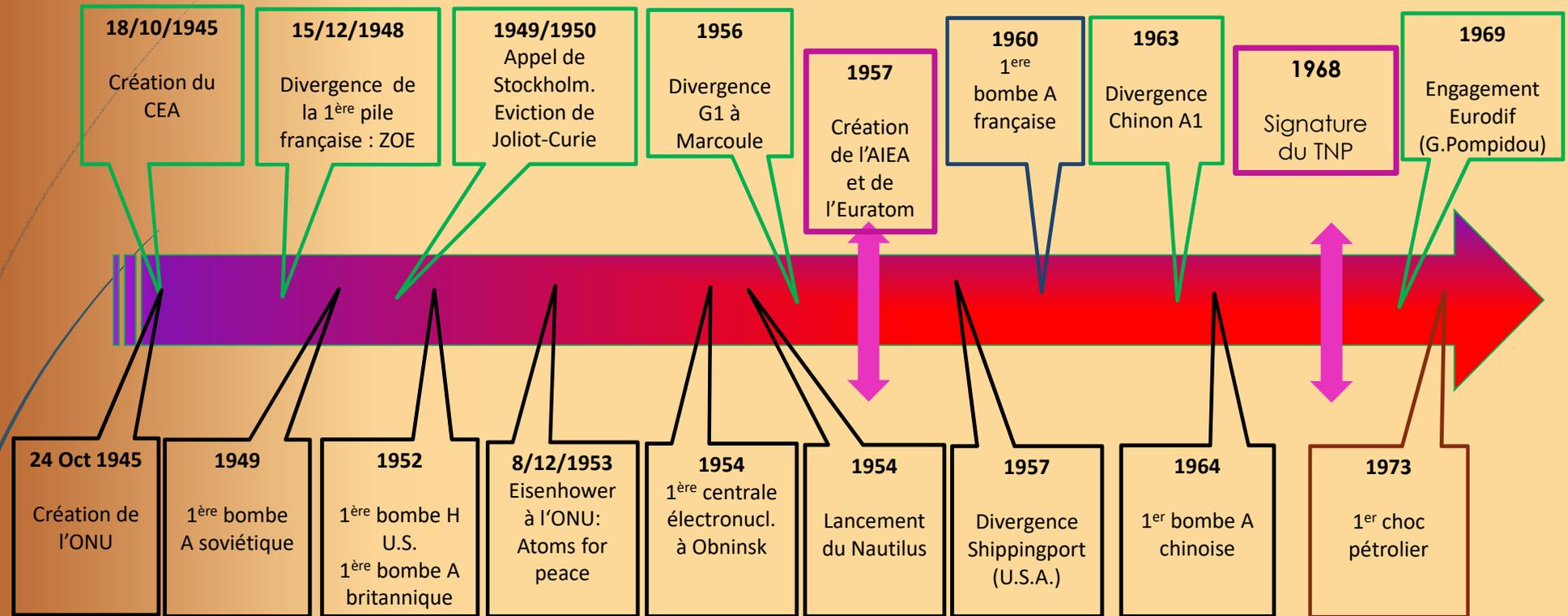
### 2 EXEMPLES DE FISSION



# Les débuts de l'ère nucléaire



# L'après guerre



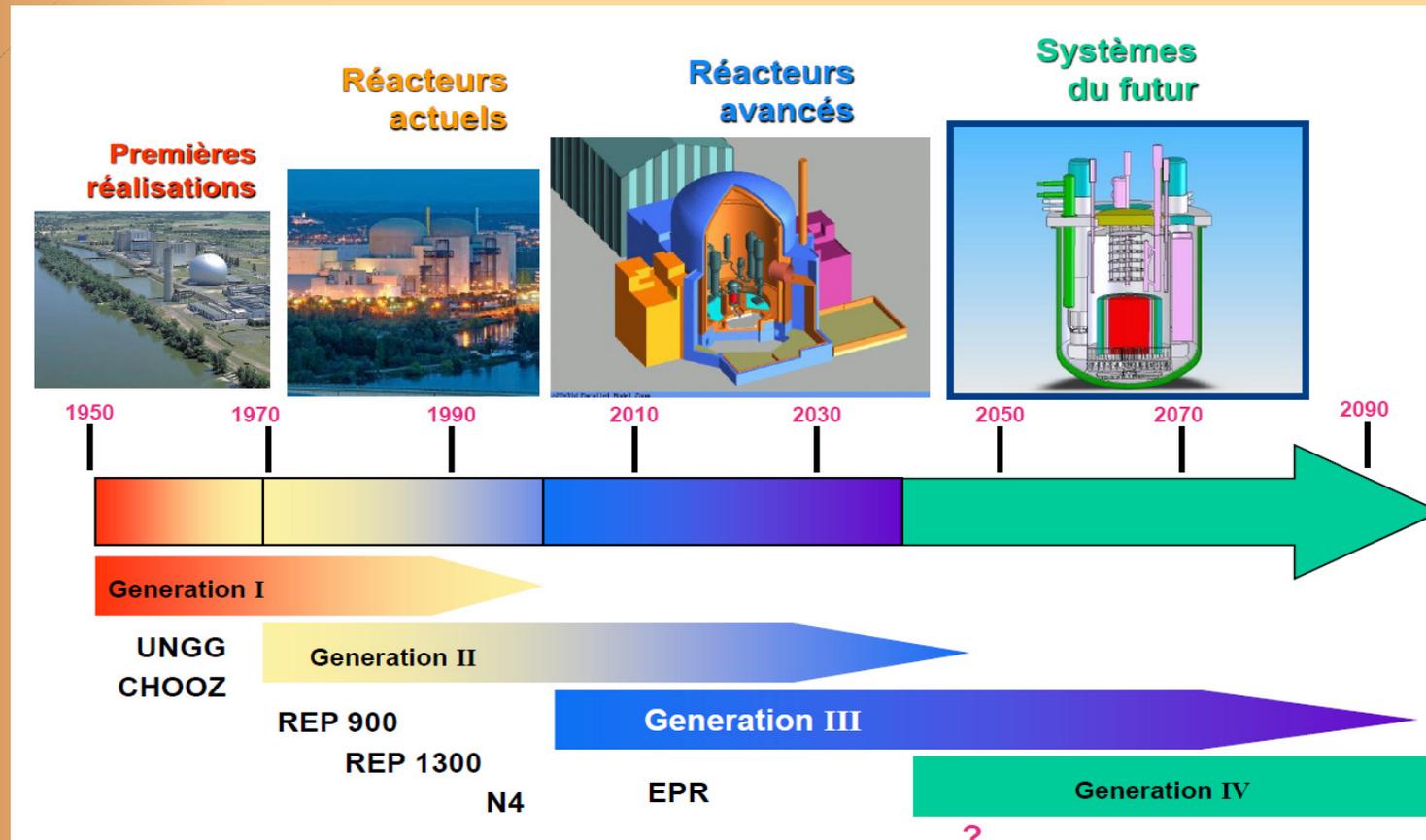
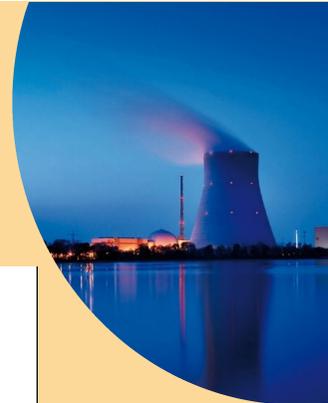
# Réacteurs nucléaires

## Principes fondamentaux

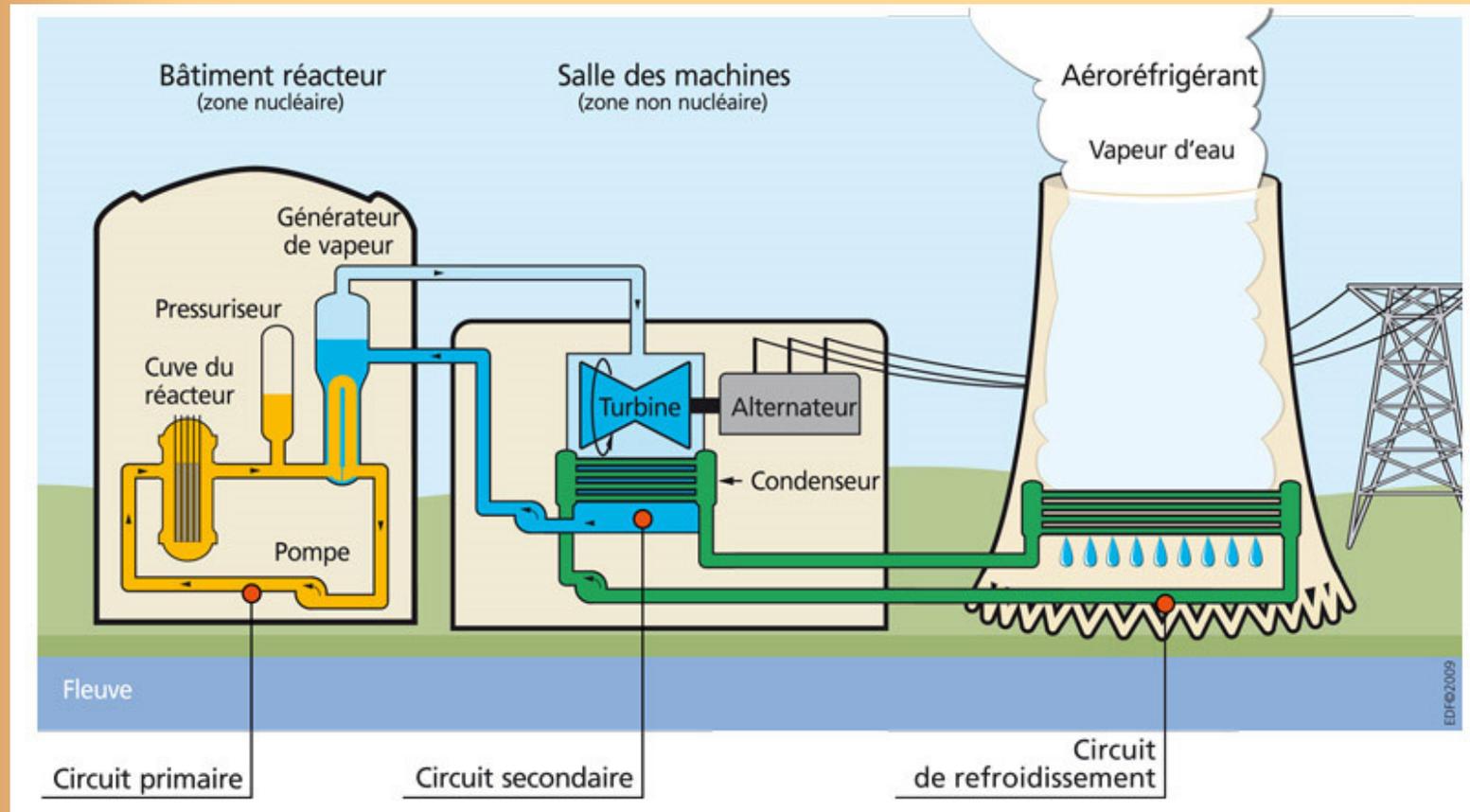
### Composants essentiels:

- ❖ **Le combustible** (Le plus souvent : l'Uranium)
- ❖ **Le modérateur** (Ralentit les neutrons, favorise la fission)
- ❖ **Le fluide caloporteur** (évacue la chaleur du cœur)
- ❖ **Les dispositifs de contrôle de la réaction**
- ❖ **L'ensemble des équipements nécessaires à la production d'électricité**

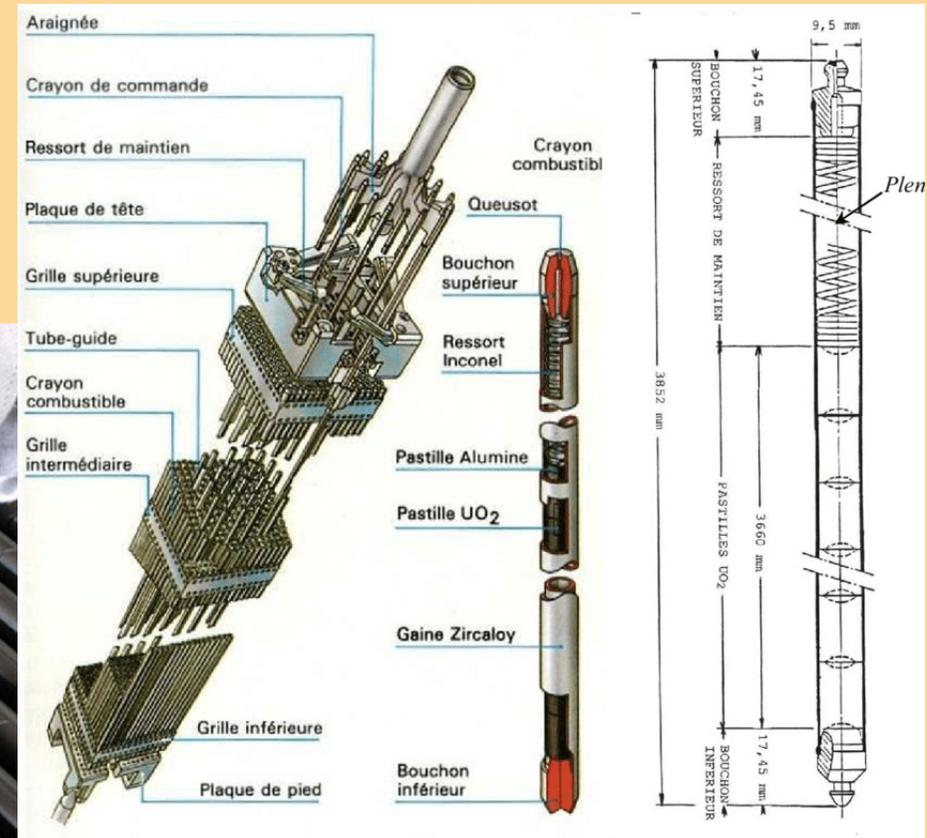
# Les générations de réacteurs électrogènes (en France)



# Schéma de principe d'un réacteur à eau pressurisée



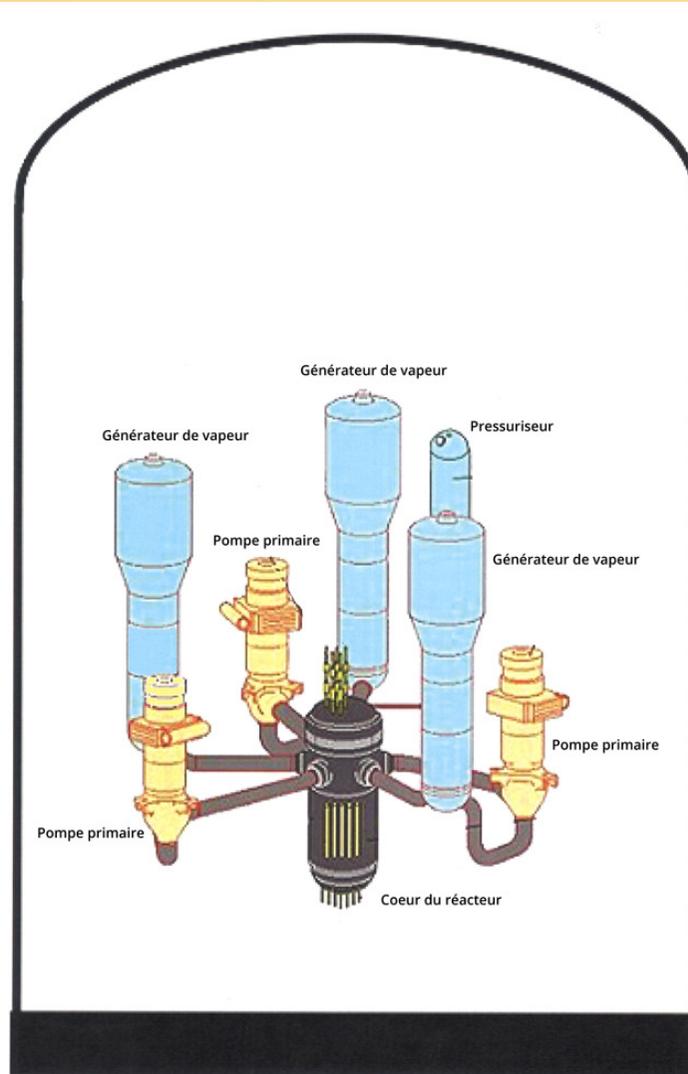
# Un élément combustible



# Le circuit primaire d'un REP

18

**GÉNÉRATEUR  
DE VAPEUR**

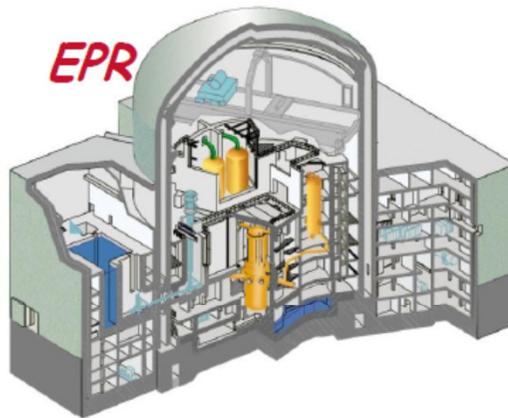


# Le hall turbo-alternateur



# Les modèles de 3ème Génération

20



*(APR 1400 Corée S)*



**APWR MHI**



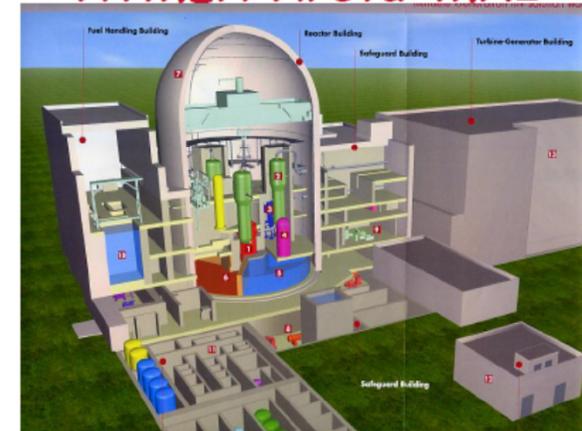
**AP 1000 W-Toshiba**



**AES 92  
Russie**



**ATMEA Areva-MHI**



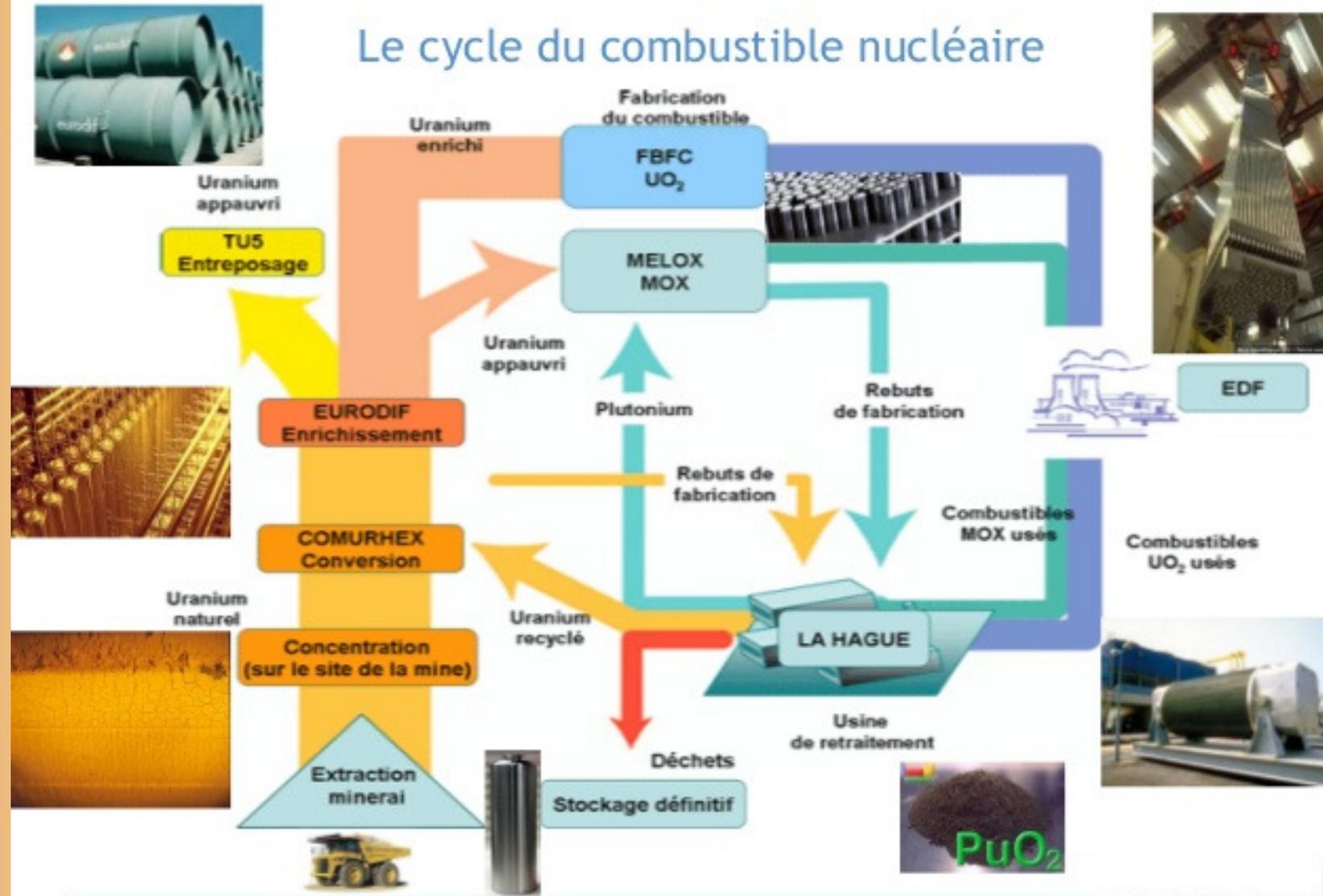
# Le CNPE du BUGEY

21

**Le CNPE  
Bugey**



# Le cycle du combustible nucléaire

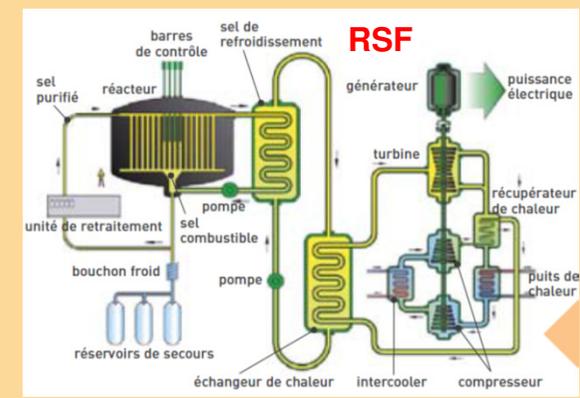
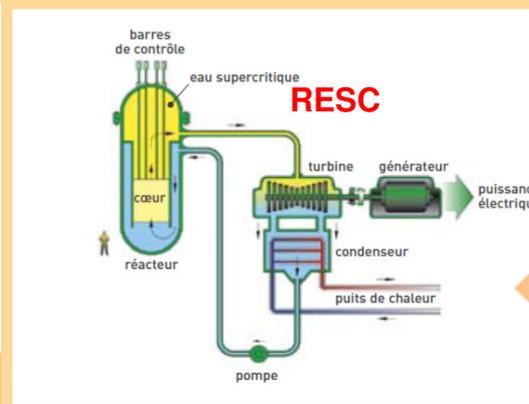
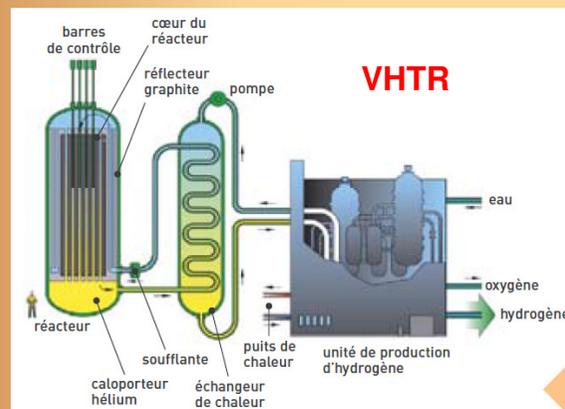
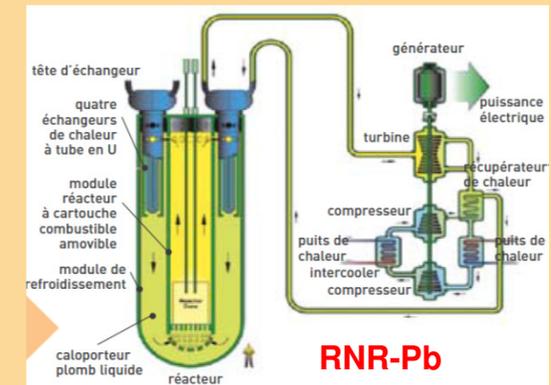
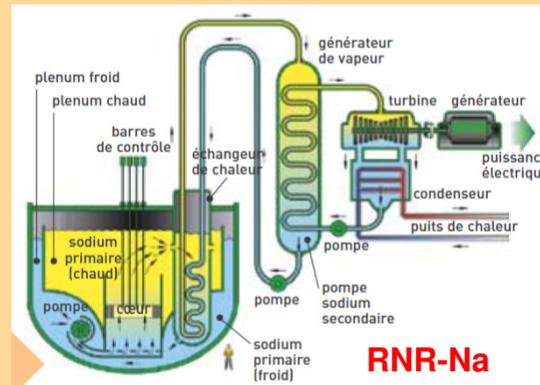
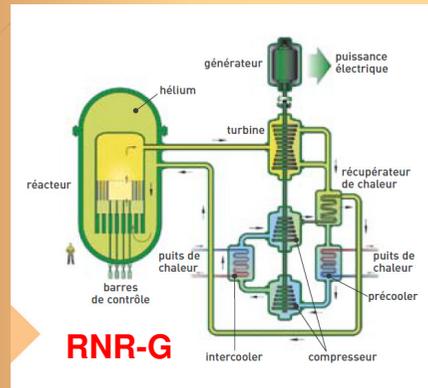


# Les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération: une dimension internationale et des objectifs communs



- Améliorer la sûreté nucléaire ;
- Améliorer la résistance à la prolifération nucléaire ;
- Minimiser le volume de déchets nucléaires  
(en recyclant et transmutant les actinides mineurs ;
- Optimiser l'utilisation des ressources naturelles ;
- Diminuer les coûts de construction et d'exploitation  
des réacteurs

# Les modèles de 4<sup>ème</sup> génération



# Les petits réacteurs modulaires

## Objectifs :

- ✓ **Puissance moyenne, adaptée aux petits réseaux**
- ✓ **Réduction du coût d'investissement initial**
- ✓ **Réduction du délai de construction,**
- ✓ **Bénéficier de l'effet de série et de la construction de modules en usine**
- ✓ **Améliorer la capacité de suivi de charge**

## Usages :

- ✓ **Production d'électricité, en remplacement des centrales de moyenne puissance (Charbon, gaz,...)**
- ✓ **Fourniture de chaleur (dessalement d'eau de mer, chauffage urbain, raffinage, production d'hydrogène, etc.**

# Les petits réacteurs modulaires

## ► Les acteurs majeurs :

- Une cinquantaine de projets dans le monde, mais 3 seulement sont opérationnels

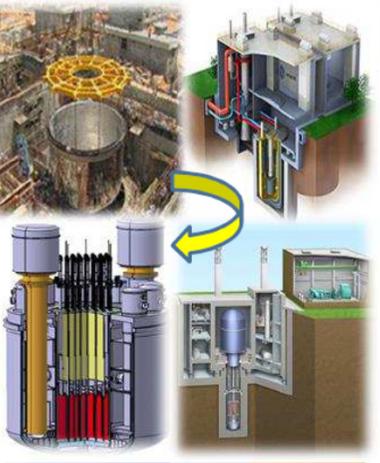


Centrale nucléaire flottante :  
Akademic Lomonosov  
2 modules de 35 MWe

- Pays en tête : USA, Russie, Inde, Chine, Japon
- En France : Projet Nuward, développé par EdF/CEA/Technicatome et Naval Group

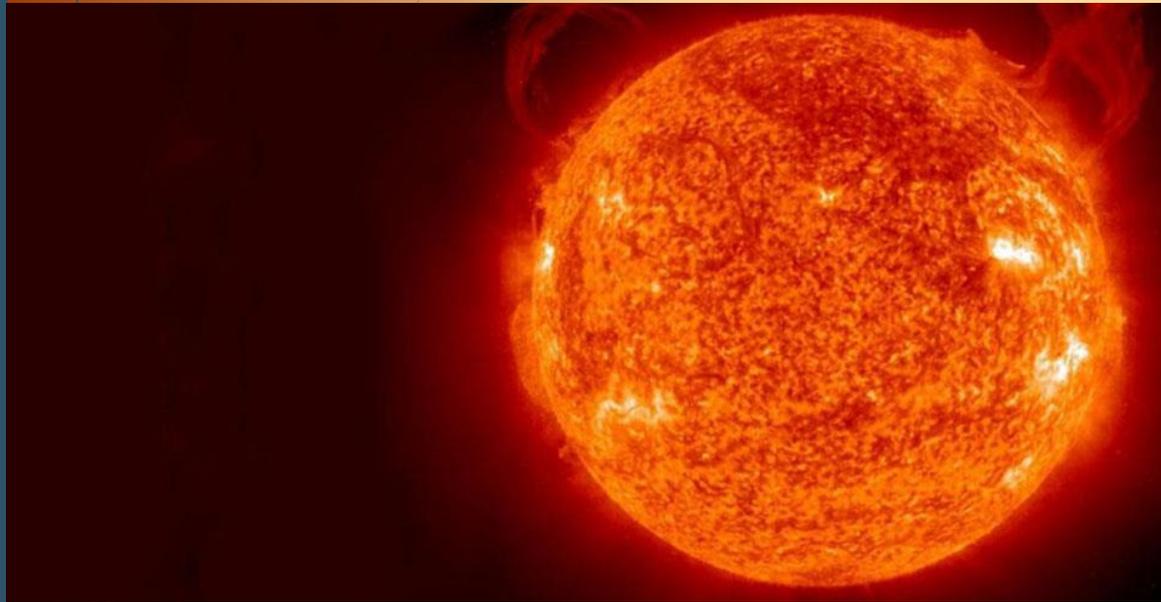
# Les petits réacteurs modulaires

SMRs for immediate & near term deployment 50 Years Atoms for Peace and Development

Water cooled SMRs	Gas cooled SMRs	Liquid metal cooled SMRs
	 <p>MSF desalination cogeneration                      Reactor: 600 MW                      Electricity: 280 MW                      Potable water: 55 000 m<sup>3</sup>/d</p>	
CAREM  SMART  ACP100  NuScale 	HTR-PM  GTHTR300  HTMR100  EM <sup>2</sup> 	PFBR  PRISM  SVBR  4S 

- ## SMR MARINS
- **EMBARQUÉS ~ 35 MWE (LOMONOSOV)**
  - **PLATEFORME, ~ 60 MWE**
  - **IMMERGEABLE ~ 160 MWE**
  - **TRANSPORTABLE ET IMMERGEABLE ~ 6 MWE**

# La fusion dans l'univers

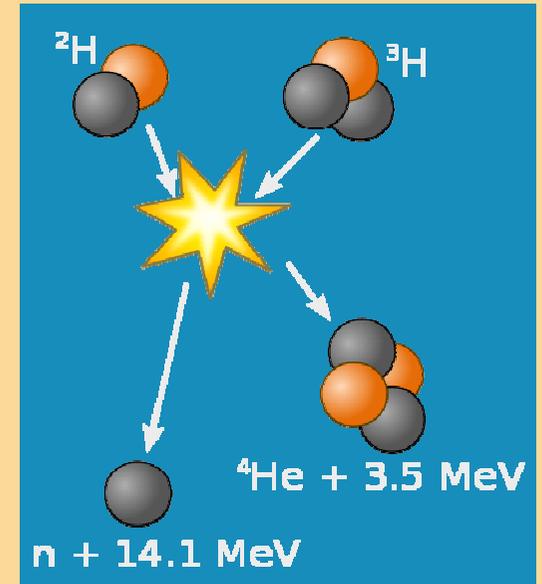


## L'énergie des étoiles !

- ❖ **1920-1930: Mise en évidence des réactions thermonucléaires à l'œuvre au cœur du Soleil et des étoiles (Eddington, Bethe, Rutherford, ....)**
- ❖ **Dans une réaction de fusion, deux noyaux atomiques légers se combinent, forment un noyau plus lourd et libèrent une grande quantité d'énergie.**
- ❖ **Les 1ères applications sont militaires : bombe H.**
- ❖ **1950 : premiers travaux de recherche pour une utilisation pacifique des réactions thermonucléaires**

# La fusion sur terre

- ❖ **En l'état actuel de la technologie, la réaction de fusion deutérium + tritium est la plus accessible, et produit un noyau d'hélium et un neutron**
- ❖ **La masse  $H_2+H_3$  est supérieure à la masse  $He_4+n$ .**  
 $\longrightarrow \Delta E = \Delta mc^2$
- ❖ **Les tokamaks\* ont été conçus dans les années 60. Ils restent les machines les plus performantes pour réaliser la fusion.**
- \* *Acronyme russe: Chambre toroïdale avec bobines magnétiques*
- ❖ **Appel à mutualisation de la recherche en 1958 : Congrès « Atoms for peace »**



**1 gramme de D-T =  
8 tonnes de pétrole**

# ITER

## International Thermonuclear Experimental Reactor

Une collaboration scientifique sans équivalent dans l'histoire  
Une expérience à grande échelle pour démontrer  
la faisabilité de l'énergie de fusion

- Chine,
- Corée,
- Inde,
- Japon,
- Russie
- Etats-Unis
- Union européenne



# Le réacteur expérimental ITER

31

## LE CRYOSTAT

10 000 T D'AIMANTS  
REFROIDIS À 4 K

100 000 KM DE  
BRINS  
SUPRACONDUCTEURS

- TEMPÉRATURE  
PLASMA > 150  
MILLIONS DE DEGRÉS

- POIDS TOTAL  
23 000 T  
(3,5 FOIS LA TOUR  
EIFFEL)

## AIMANTS SUPRACONDUCTEURS

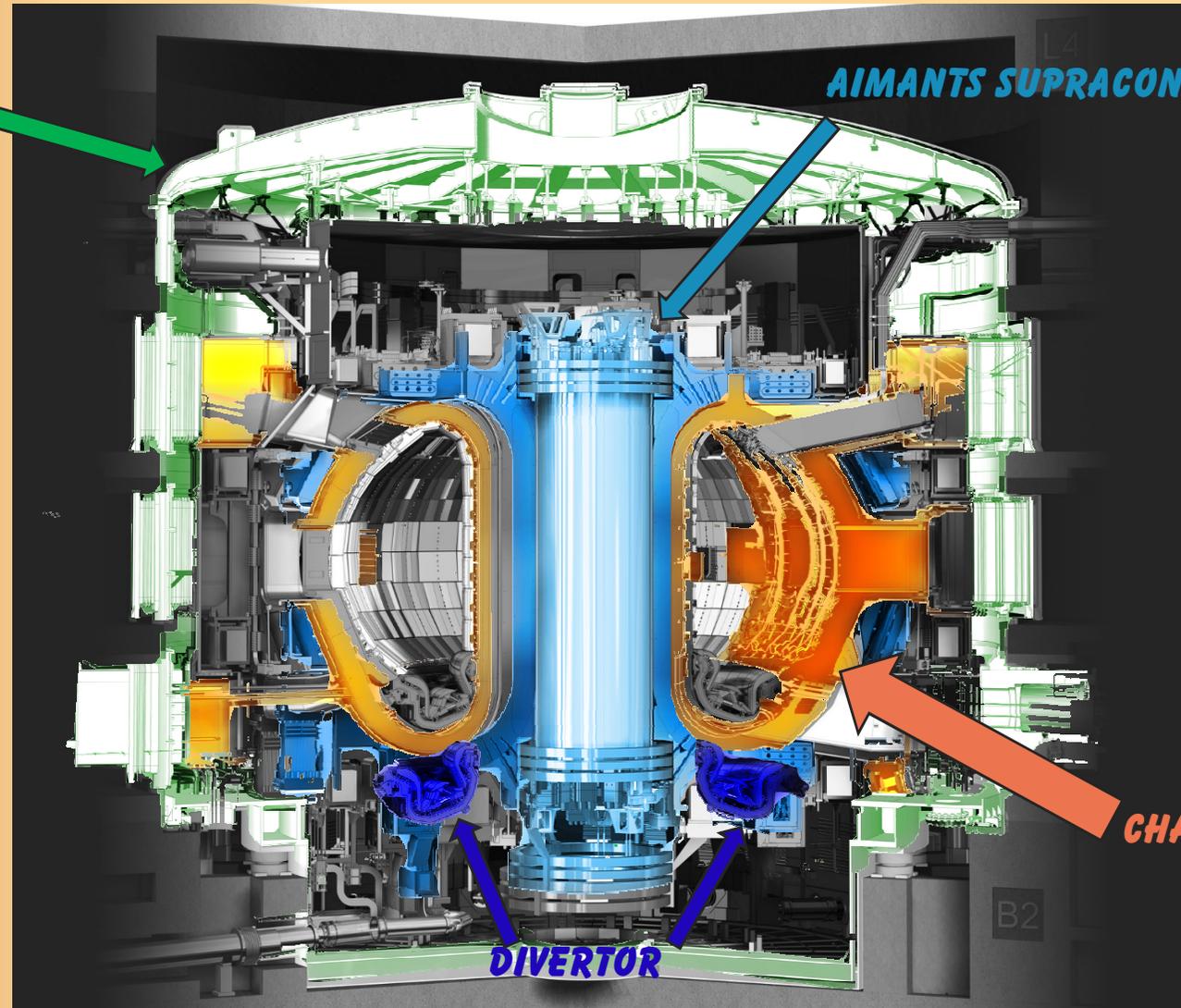
CRYOSTAT  
16 000 M<sup>3</sup>

DIAMÈTRE  
EXT. : 19 M

HAUTEUR :  
11 M

VOLUME  
CHAMBRE  
À VIDE:  
1 000 M<sup>3</sup>

CHAMBRE À VIDE

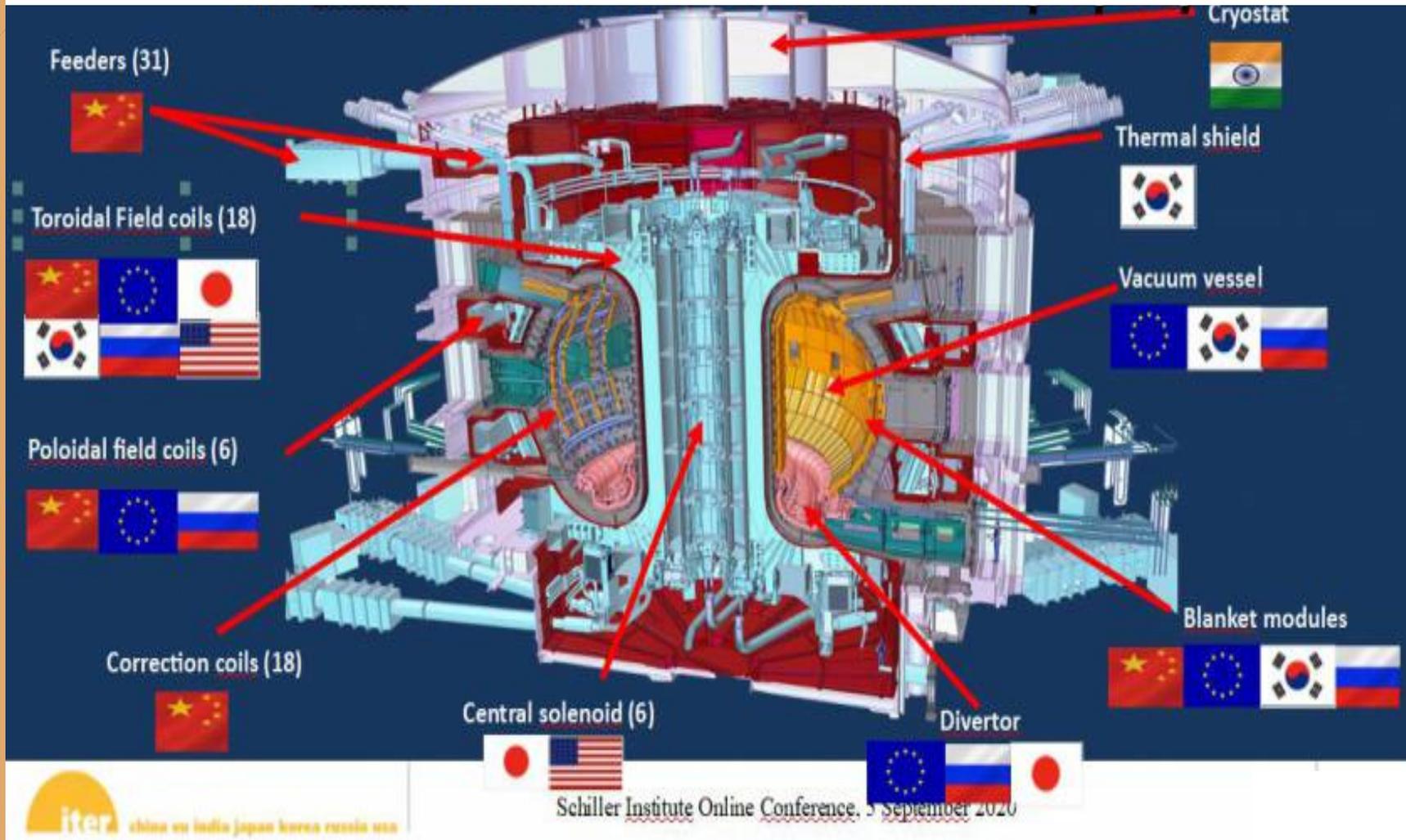


**Une Tour de Babel exemplaire**

**Propriété intellectuelle partagée entre tous les Etats**

# Qui fabrique quoi?

## Une coopération internationale unique



# ITER : quelques repères

- **Construction du démonstrateur ITER à Cadarache**
- **35 pays participent à la conception et la construction**
- **Premier coup de pioche en 2007**
- **Premiers éléments lourds sur site en 2015**
- **Calendrier objectif : premier plasma en 2025.**
- **Coût de la construction estimé à ~20 milliards d'€**
- **Financement 45,6% par l'UE et les pays membres, le solde partagé à parts égales entre les autres pays membres (essentiellement, contributions en nature)**

*Et après?... Projet Démo: préfiguration d'un réacteur électrogène à fusion, pour déploiement éventuel au XXIIème siècle.*

# ITER – le chantier mi-2019



M. Simon - Université Ouverte Lyon1 – 13 novembre 2020



Rhône  
Ain  
Loire



**« Dans la vie, rien n'est à craindre,  
tout est à comprendre.**

**Il est temps de comprendre  
davantage pour que nous ayons  
moins peur du progrès. »**

**Marie Curie**

**Merci de votre attention**