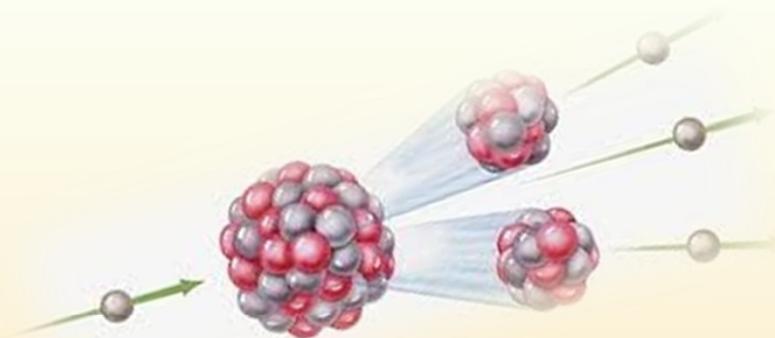
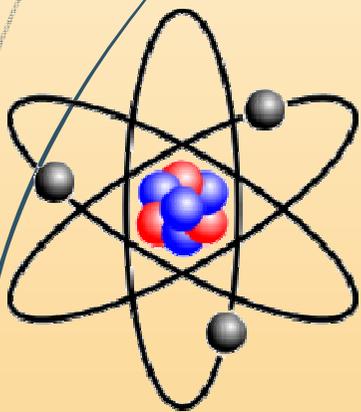


GR

SFEN

Rhône
Ain
Loire



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

Michel Simon
Vice-Président SFENRAL

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* »**



Comment classer les éléments?

Dmitri Mendeleïev établit une classification des éléments en 1869

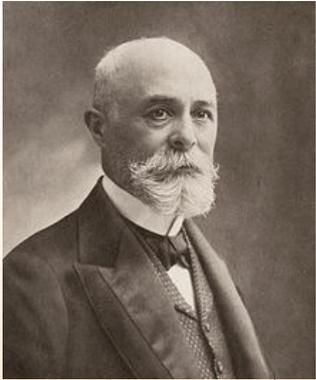
TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

1 H HYDROGÈNE 1,0079																	2 He HELIUM 4,0026
3 Li LITHIUM 6,941	4 Be BÉRYLLIUM 9,0122											5 B BORE 10,811	6 C CARBONE 12,011	7 N AZOTE 14,007	8 O OXYGÈNE 15,999	9 F FLUORINE 18,998	10 Ne NEON 20,1797
11 Na SODIUM 22,989	12 Mg MAGNÉSIMUM 24,305											13 Al ALUMINIUM 26,981	14 Si SILICIUM 28,085	15 P PHOSPHORE 30,974	16 S SULFURE 32,066	17 Cl CHLORINE 35,453	18 Ar ARGON 39,948
19 K POTASSIUM 39,098	20 Ca CALCIUM 40,078	21 Sc SCANDIUM 44,955	22 Ti TITANE 47,867	23 V VANADIUM 50,9415	24 Cr CHROME 51,9961	25 Mn MANGANESE 54,938	26 Fe FER 55,845	27 Co COBALT 58,933	28 Ni NICKEL 58,6934	29 Cu CUIVRE 63,546	30 Zn ZINC 65,38	31 Ga GALLIUM 69,723	32 Ge GERMANIUM 72,63	33 As ARSENIC 74,921	34 Se SÉLÉNIUM 78,971	35 Br BROMINE 79,904	36 Kr KRYPTON 83,798
37 Rb RUBIDIUM 85,467	38 Sr STRONTIUM 87,62	39 Y YTTRIUM 88,9058	40 Zr ZIRCONIUM 91,224	41 Nb NIOBIUM 92,9063	42 Mo MOLYBDÈNE 95,95	43 Tc TECHNÉTIUM (98)	44 Ru RUTHÉNIUM 101,07	45 Rh RHODIUM 102,90	46 Pd PALLADIUM 106,42	47 Ag ARGENT 107,8682	48 Cd CADMIUM 112,414	49 In INDIUM 114,818	50 Sn ÉTAIN 118,710	51 Sb ANTIMOINE 121,760	52 Te TELLURE 127,60	53 I IODE 126,90	54 Xe XÉNON 131,293
55 Cs CÉSURIUM 132,905	56 Ba BARYUM 137,327	57-71*	72 Hf HAFNIUM 178,49	73 Ta TANTALE 180,94	74 W TUNGSTÈNE 183,84	75 Re RHÉNIUM 186,207	76 Os OSMIUM 190,23	77 Ir IRIDIUM 192,217	78 Pt PLATINE 195,084	79 Au OR 196,96	80 Hg MÉRURE 200,59	81 Tl THALLIUM 204,38	82 Pb PLOMB 207,2	83 Bi BISMUTH 208,98	84 Po POLONIUM (209)	85 At ASTATINE (210)	86 Rn RADON (222)
87 Fr FRANCIUM (223)	88 Ra RADIUM (226)	89 Ac ACTINIUM (227)	90 Th THORIUM 232,0377	91 Pa PROTACTINIUM 231,03	92 U URANIUM 238,02												
		57 La LANTHANE 138,90	58 Ce CÉRIUM 140,116	59 Pr PRASÉOYME 140,90	60 Nd NÉODYME 144,242	61 Pm PROMÉTHIUM (145)	62 Sm SAMARIUM 150,36	63 Eu EUROPIUM 151,964	64 Gd GADOLINIUM 157,25	65 Tb TERBIUM 158,92	66 Dy DYSPROSIUM 162,500	67 Ho HOLMIUM 164,93	68 Er ERBIUM 167,259	69 Tm THULIUM 168,93	70 Yb YTTÉRIUM 173,054	71 Lu LUTÉCIUM 174,968	

- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transitions
- Métaux pauvres
- Métalloïdes
- Halogènes
- Gaz nobles
- Lanthanide
- Actinide



La radioactivité naturelle



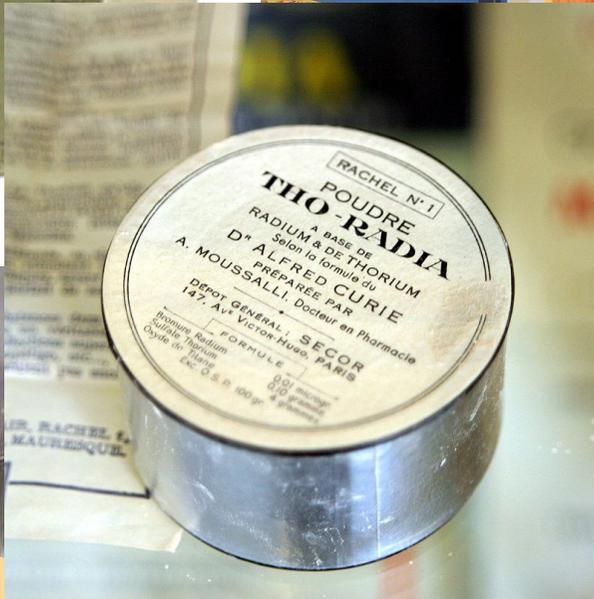
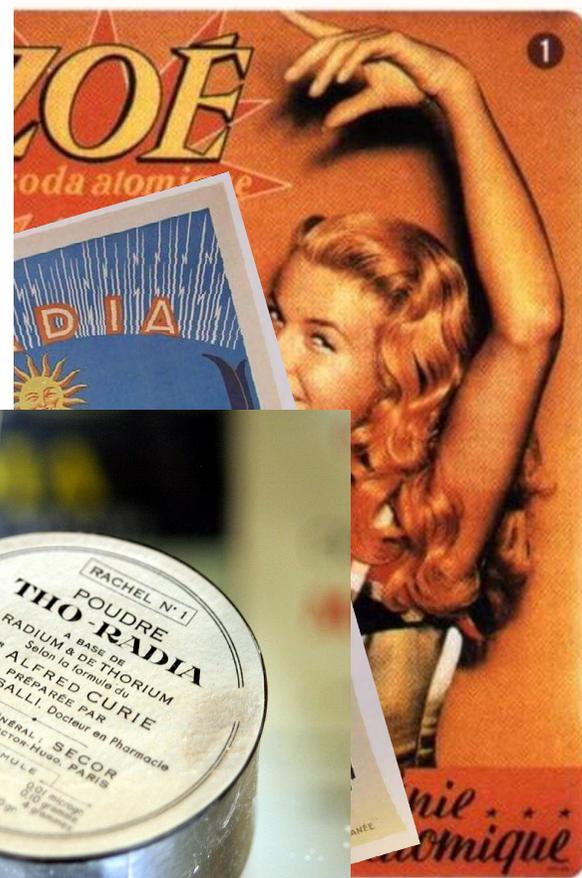
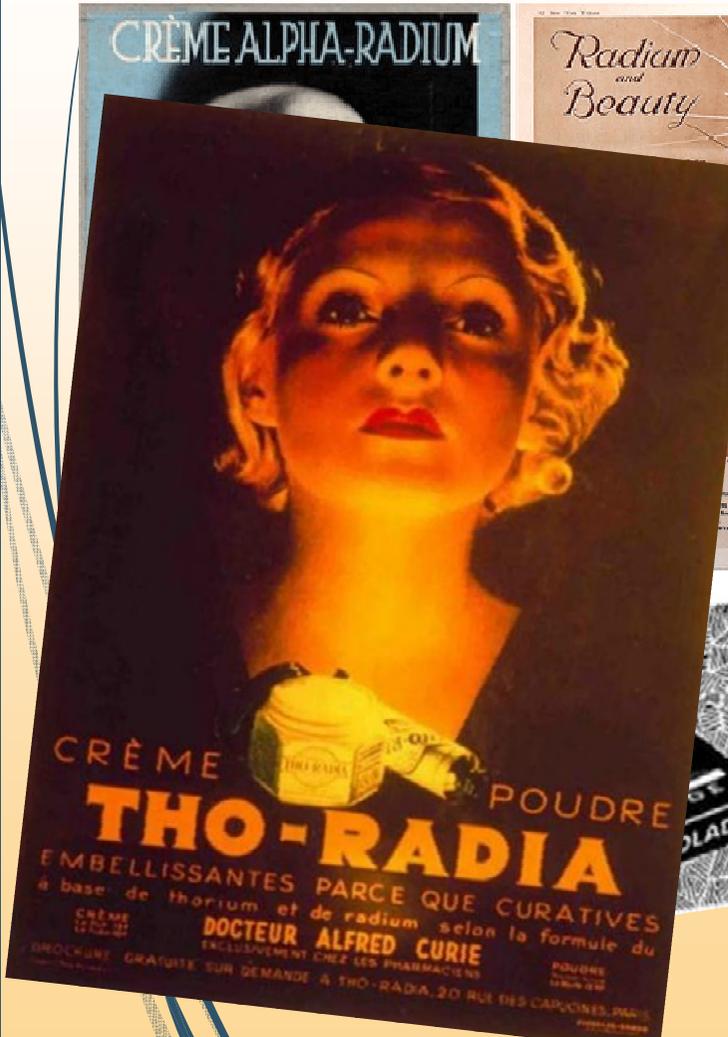
► **Henri Becquerel découvre « par hasard » la radioactivité artificielle en 1896**

► **Marie Curie:**

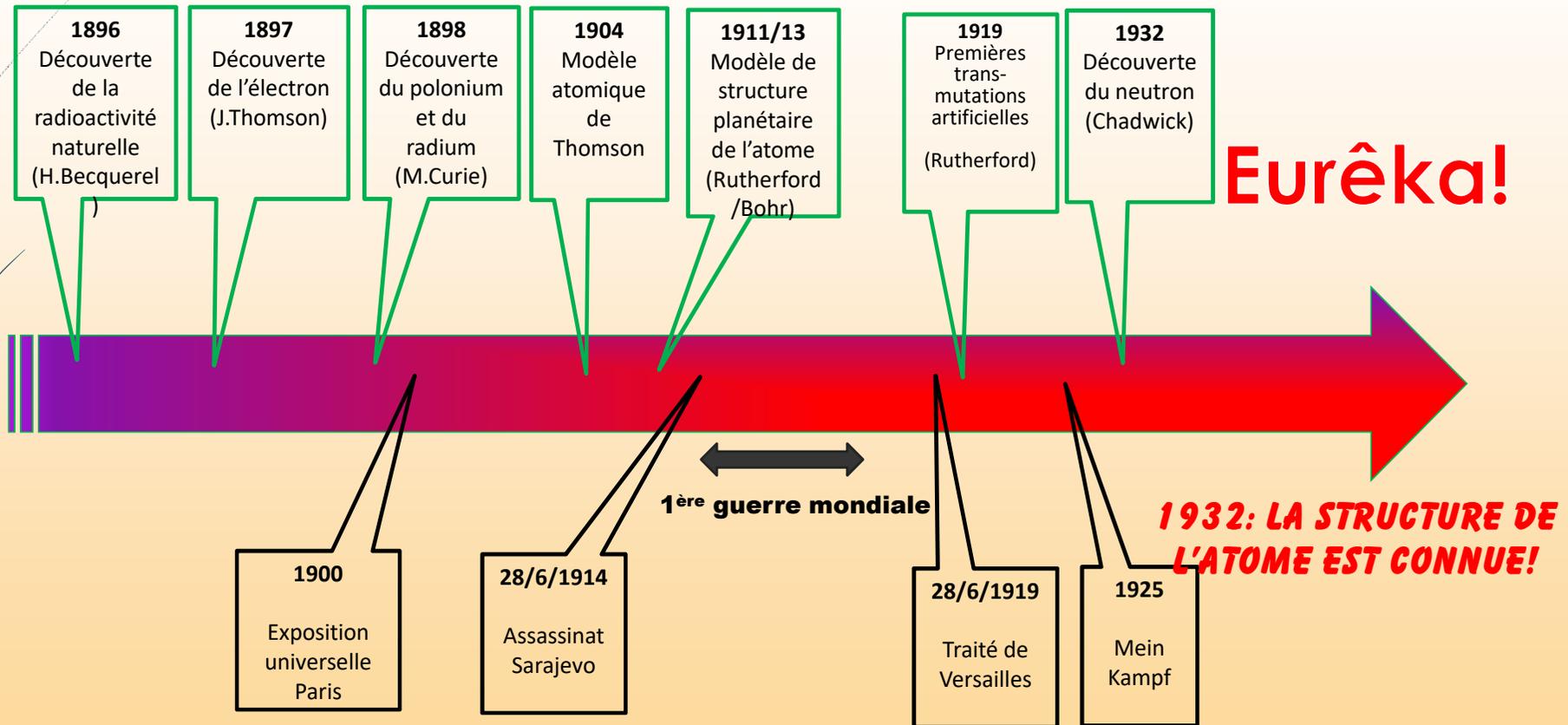
- **Retient l'étude des rayons uraniques comme sujet de thèse en 1897**
- **Découvre le Polonium et le Radium en 1898**
- **Développe la curie-thérapie**
- **Crée et exploite les « petites curies » pendant la guerre**



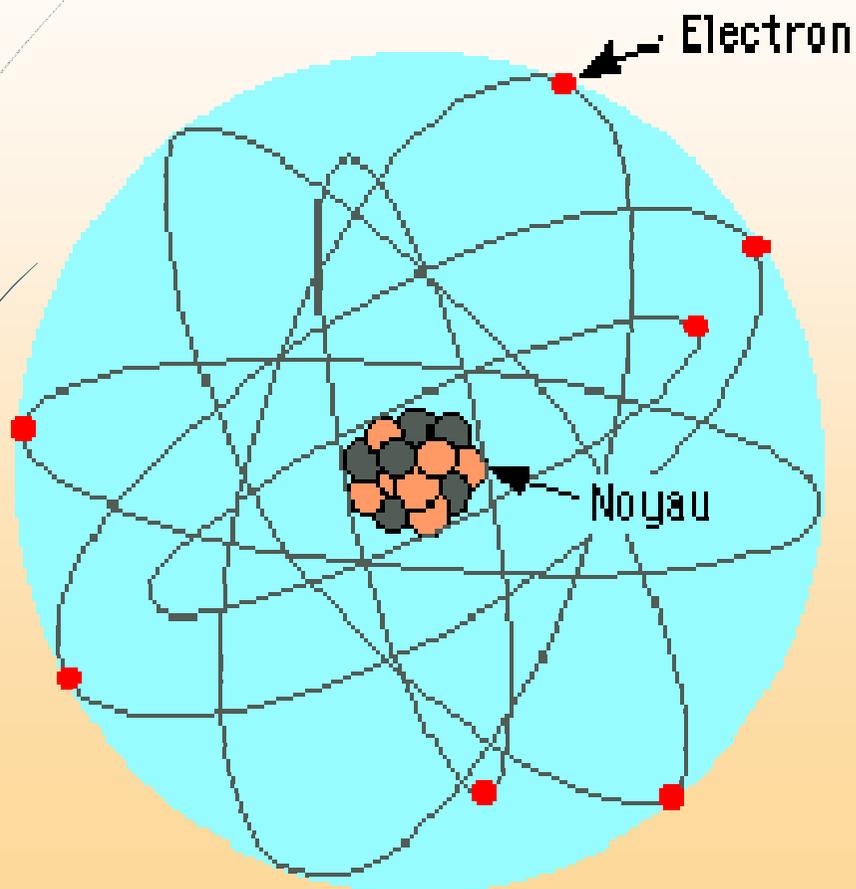
La radioactivité, remède miracle!



L'époque de la recherche



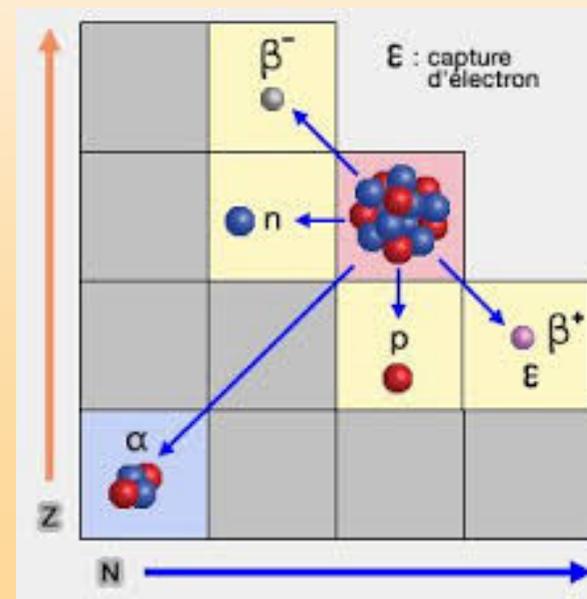
Structure de l'atome



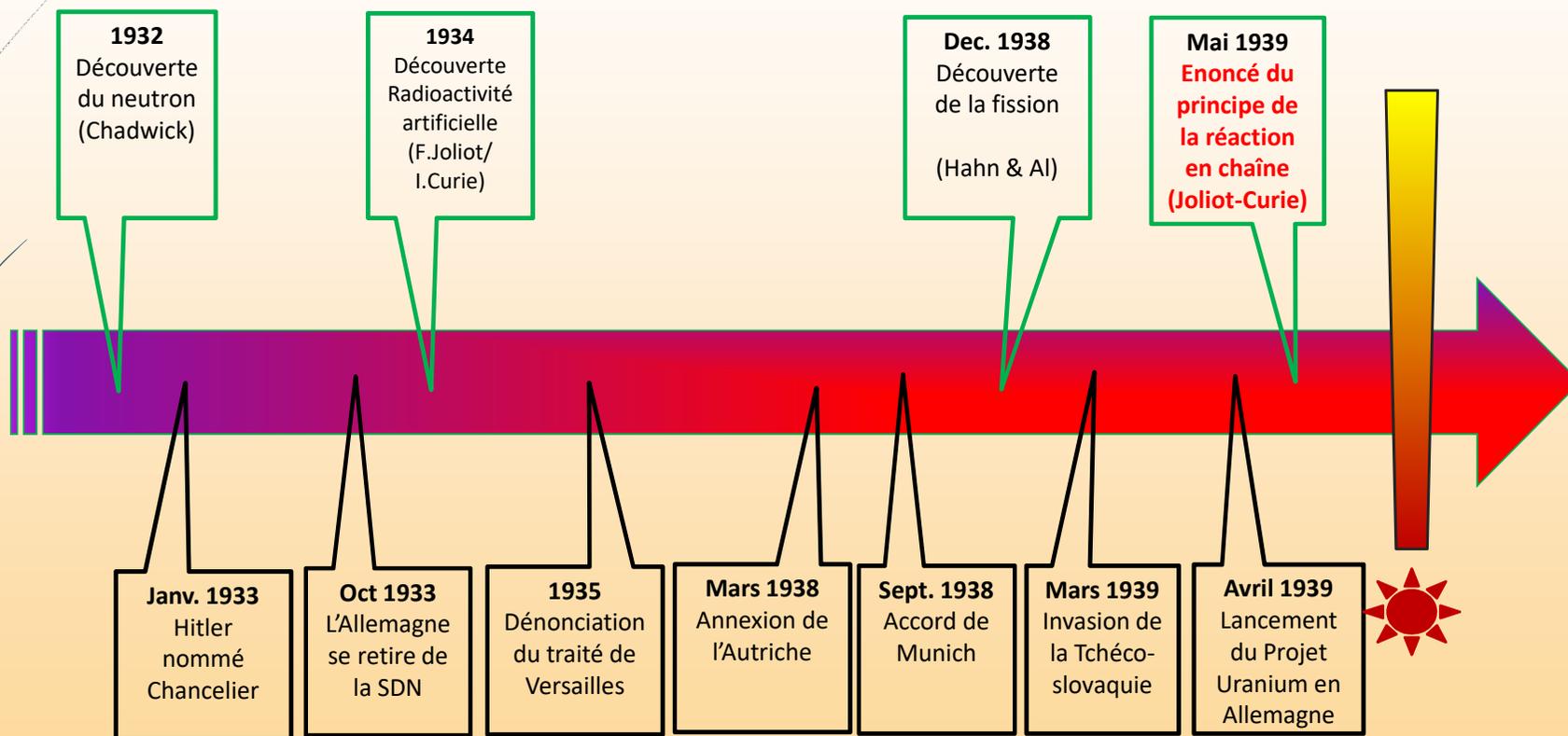
$^{235}_{92}\text{U}$

92 protons – 143 neutrons
3 isotopes naturels : 234/235/238
26 isotopes connus

ment
e / etc.)



L'époque de la recherche



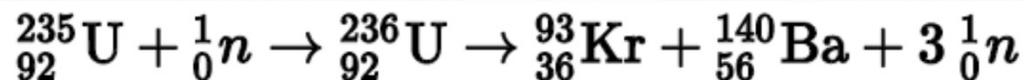
La fission de l'U235

ECART DE MASSE: 0,2%

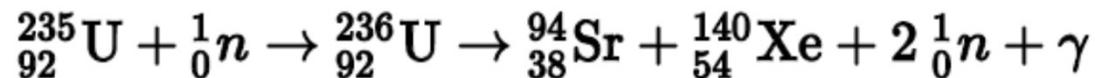
**SOIT UNE ÉNERGIE
LIBÉRÉE DE : 200 MEV**

CAR $E = MC^2$

**DÉCOUVERTE FIN 1938
PAR FRITZ, STRASSMANN
ET LISE MEITNER**



2 EXEMPLES DE FISSIONS



La fission de l'U235

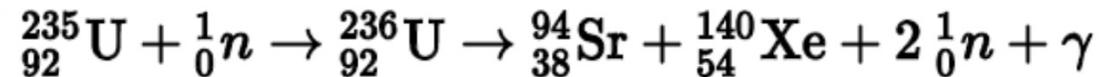
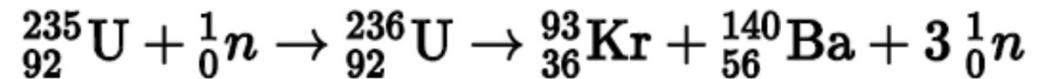
ECART DE MASSE: 0,2%

**SOIT UNE ÉNERGIE
LIBÉRÉE DE : 200 MEV**

CAR $E = MC^2$

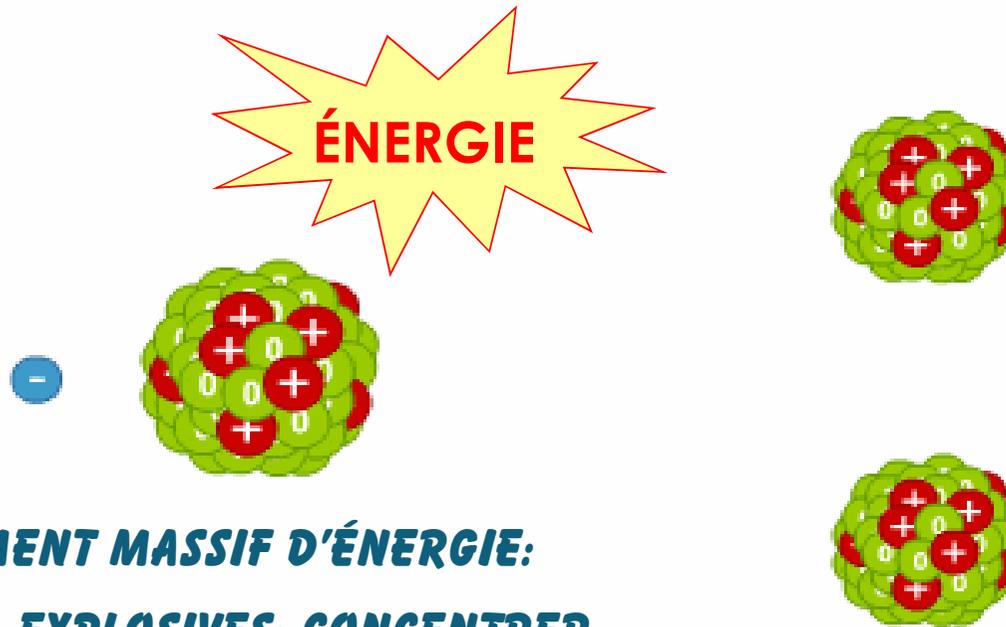
**DÉCOUVERTE FIN 1938
PAR FRITZ, STRASSMANN
ET LISE MEITNER**

2 EXEMPLES DE FISSIONS



La réaction en chaîne

DÉCOUVERTE EN MAI 1939 PAR F.JOLIOT-CURIE



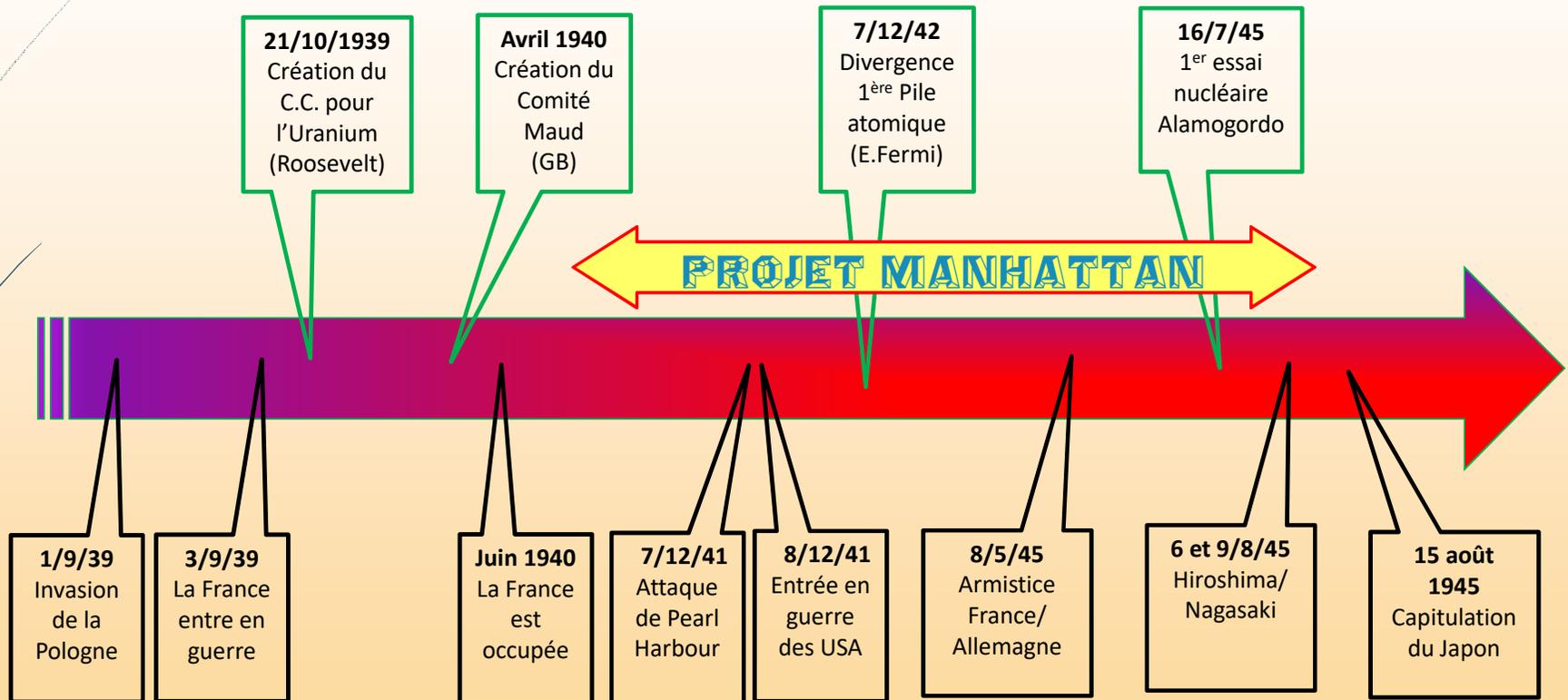
➔ **DÉGAGEMENT MASSIF D'ÉNERGIE:**

*** APPLIC. EXPLOSIVES: CONCENTRER
LES ATOMES FISSILES**

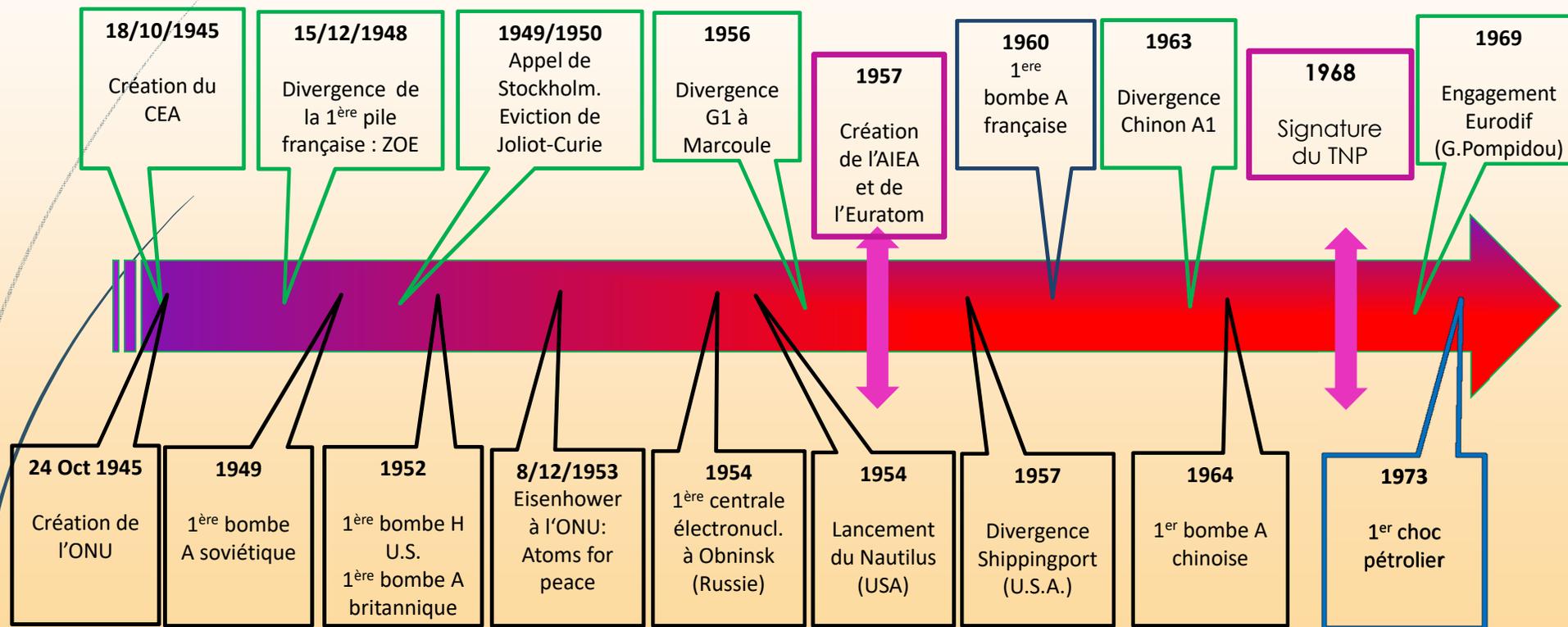
*** APPLIC. INDUSTRIELLES:
MAÎTRISER LE FLUX DES NEUTRONS**

...MAIS CE N'EST PAS SI SIMPLE!

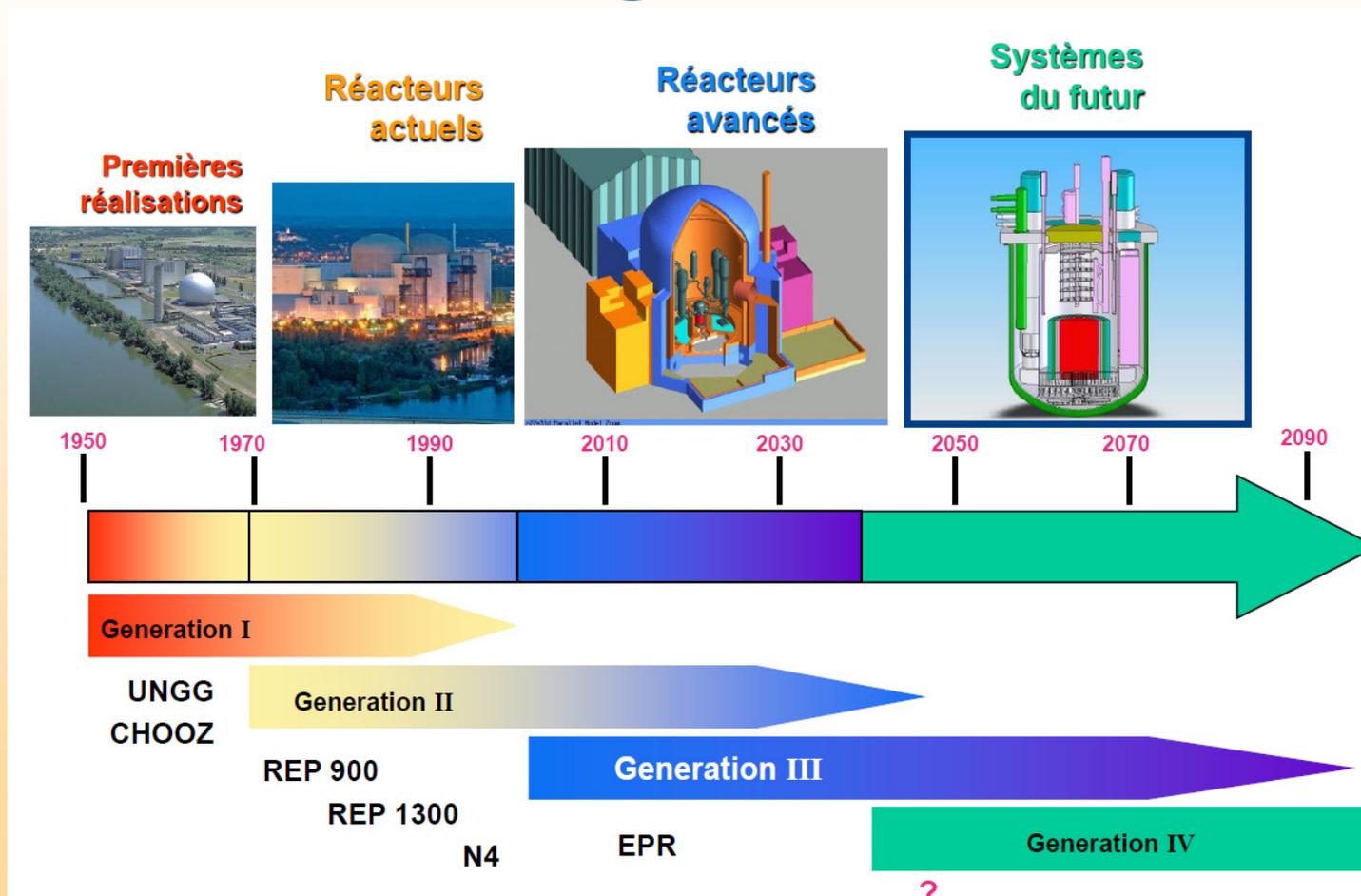
Les débuts de l'ère nucléaire



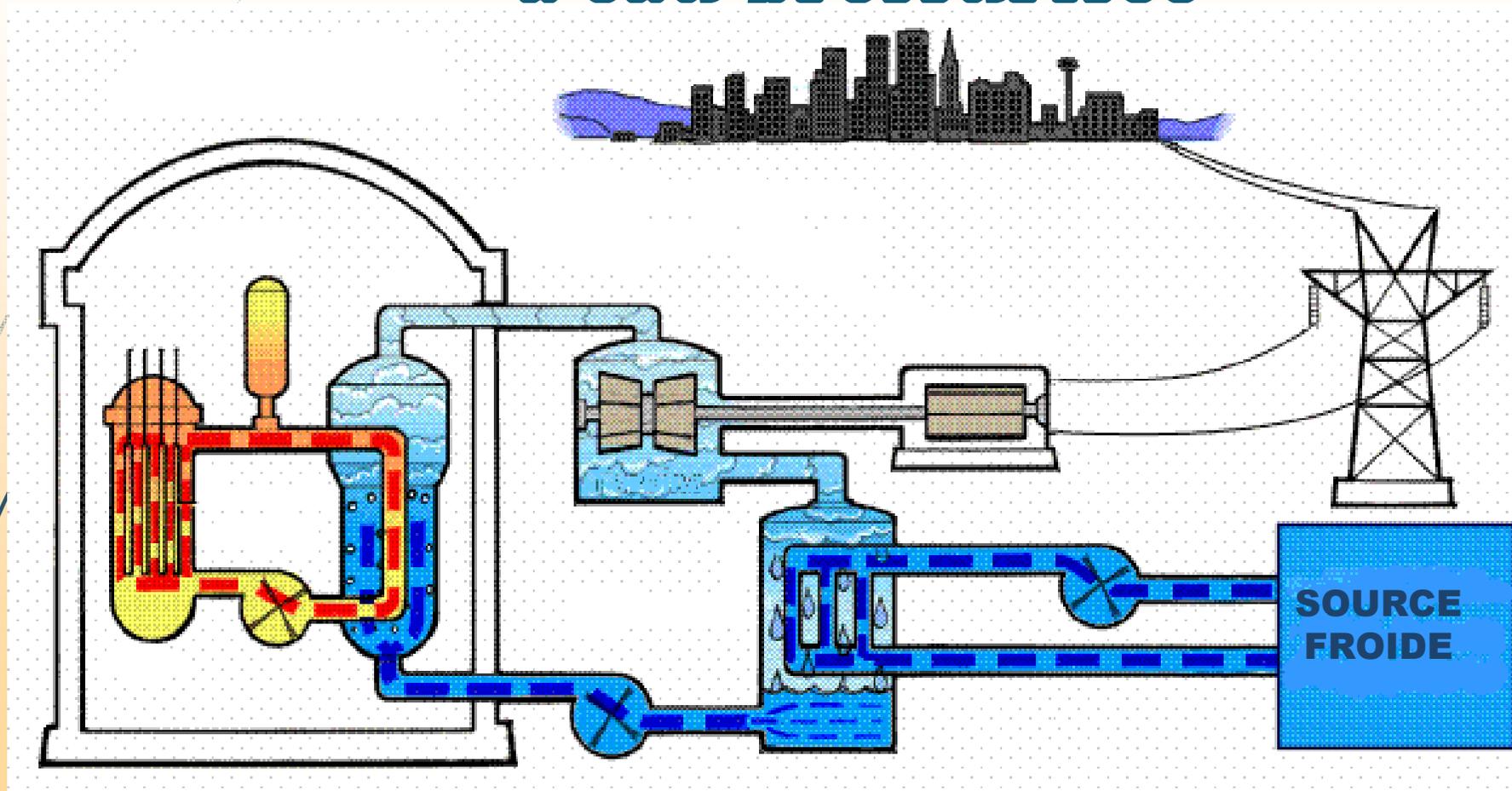
L'après guerre



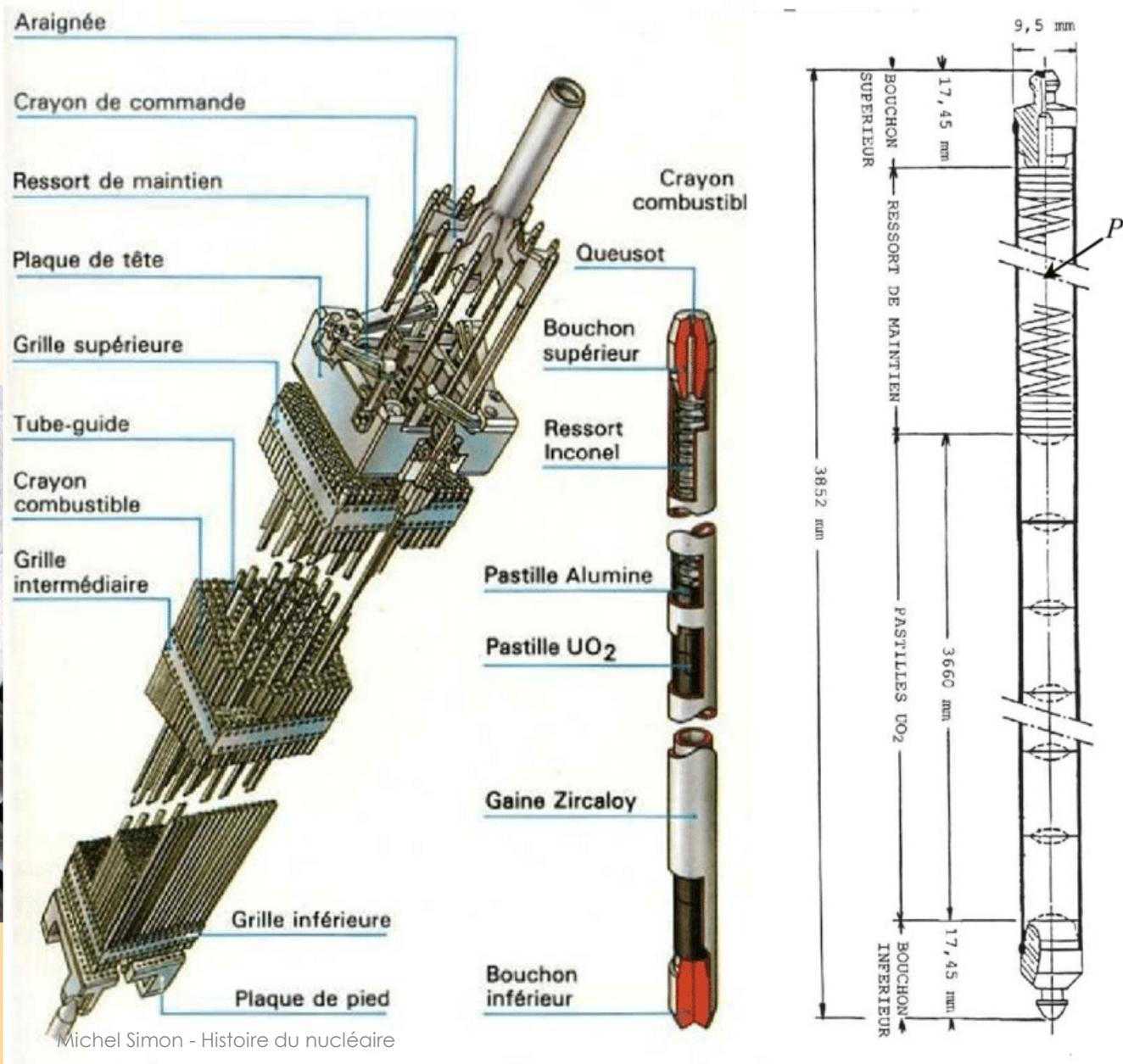
Les générations de réacteurs électrogènes (en France)



Shéma de principe d'un réacteur à eau pressurisée



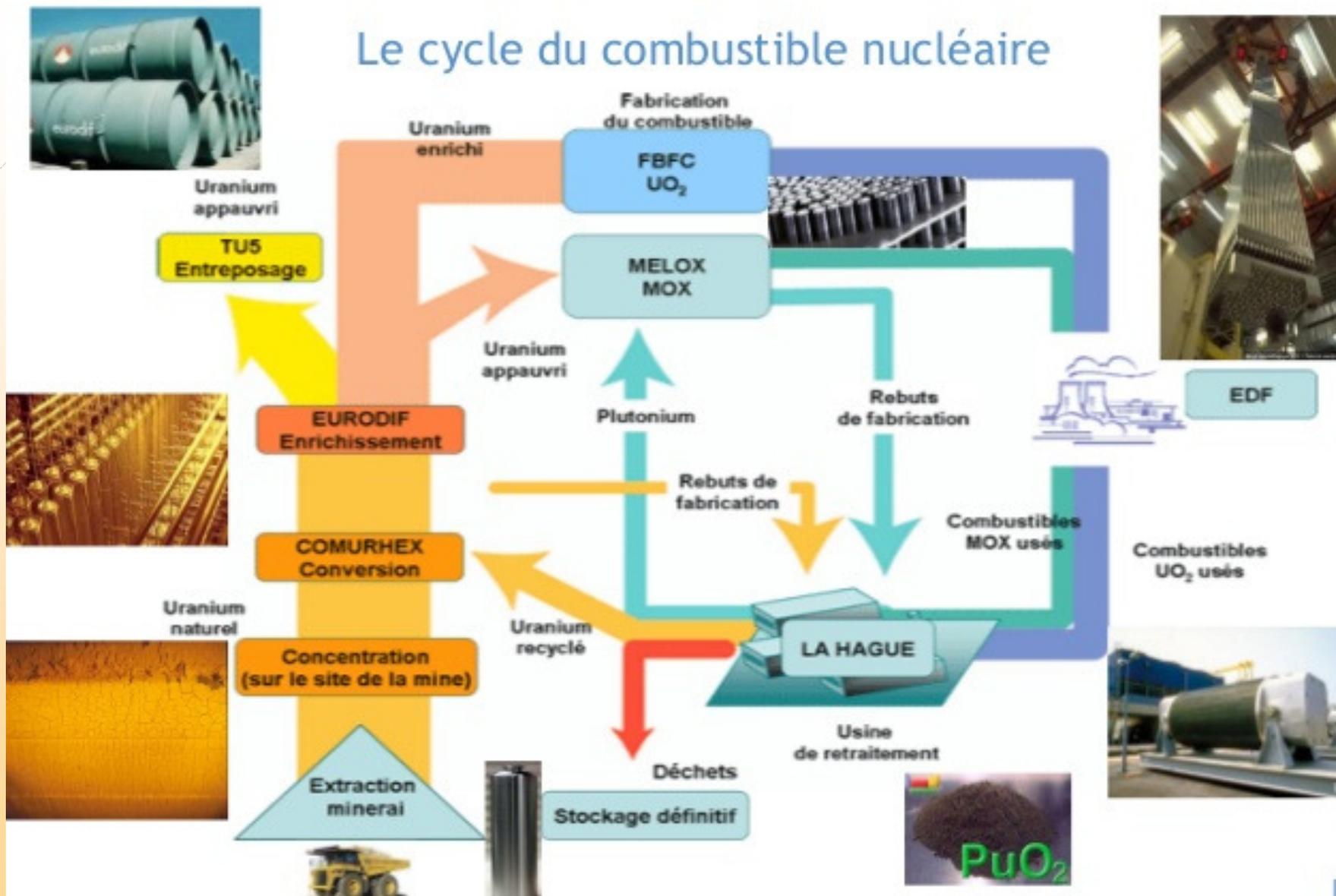
Un élément combustible



Le hall turbo-alternateur



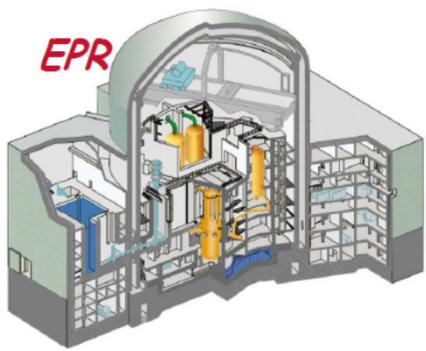
Le cycle du combustible nucléaire



L'électronucléaire dans le monde

- ▶ **Au 1/1/2019 : 450 réacteurs opérationnels, dont: 96 aux USA, 58 en France, 46 en Chine, 24 en Corée du sud, 22 en Inde,...**
- ▶ **Dans l'U.E.:**
 - **Au 31/12/2019: 126 réacteurs dans 14 pays,**
 - **26% de l'électricité de l'U.E. est d'origine nucléaire.**
- ▶ **57 unités en construction, dans 16 pays**
- ▶ **~150 planifiés et ~350 projets en instruction**

Les modèles de 3ème Génération



EPR

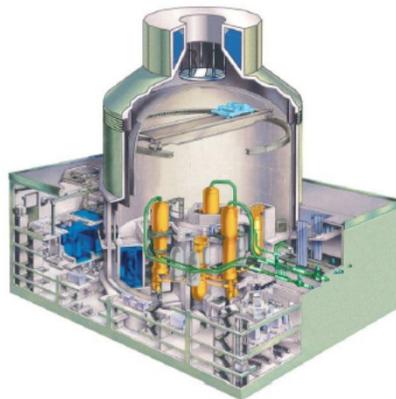
(APR 1400 Corée S)



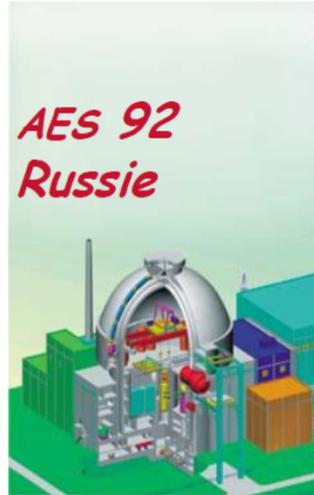
APWR MHI



AP 1000 W-Toshiba



**AES 92
Russie**



ATMEA Areva-MHI



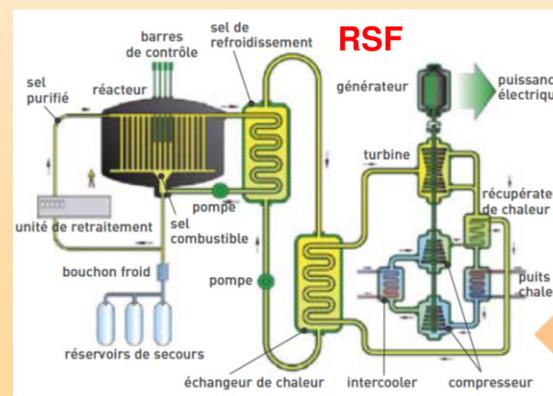
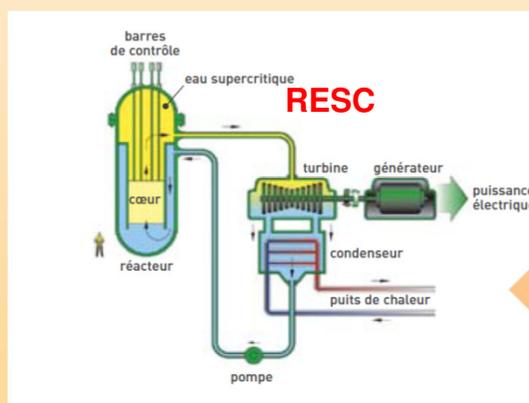
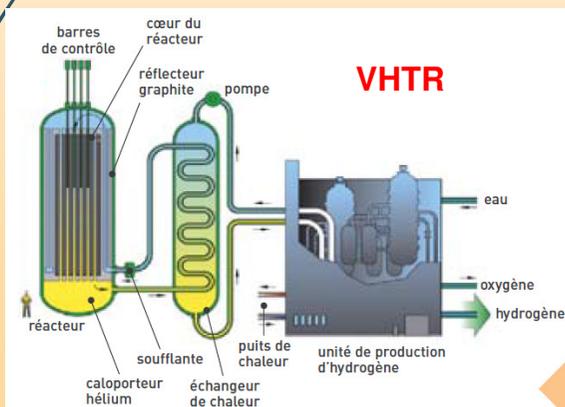
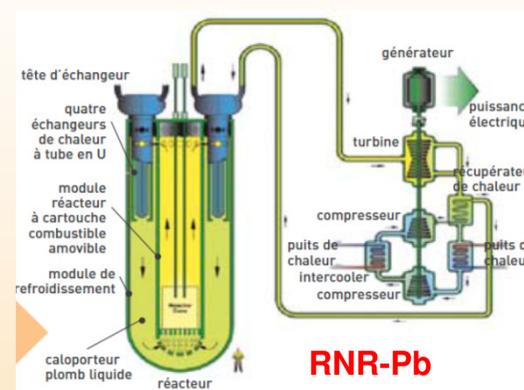
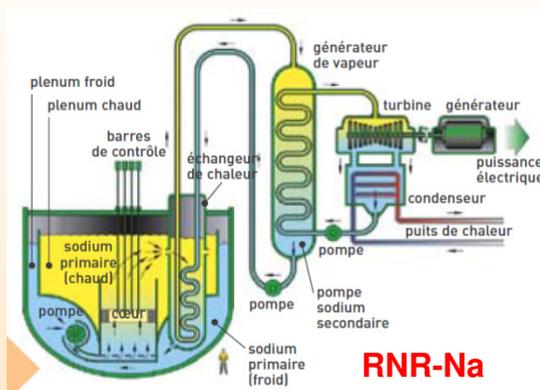
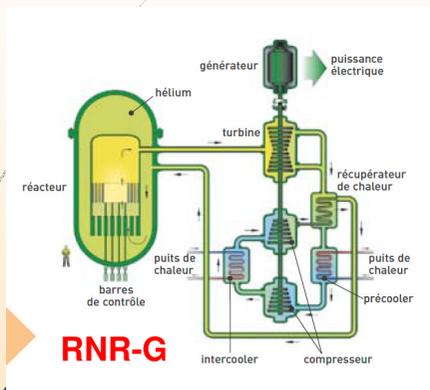
La 4^{ème} génération: une dimension internationale



- + U.E. en 2003
- + C.E.I (Russie) en 2006
- + Chine en 2006

- 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^{ème} génération



Les petits réacteurs modulaires

SMRs for immediate & near term deployment



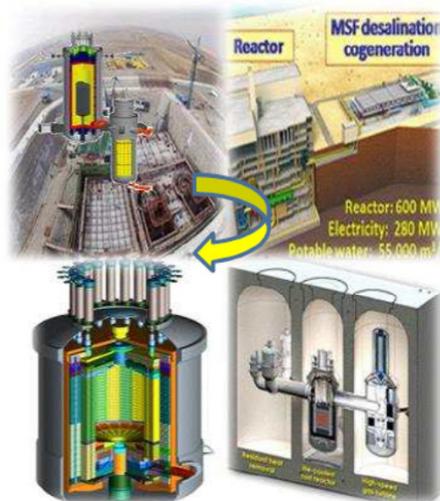
Water cooled SMRs



CAREM
SMART
ACP100
NuScale



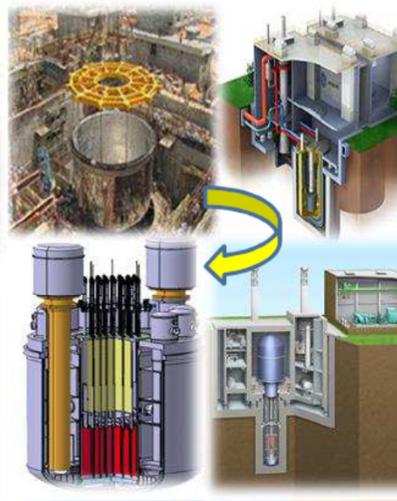
Gas cooled SMRs



HTR-PM
GTHTR300
HTMR100
EM²



Liquid metal cooled SMRs



PFBR
PRISM
SVBR
4S



SMR MARINS

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

La fusion nucléaire

1 gramme de DT = 8 tonnes de pétrole

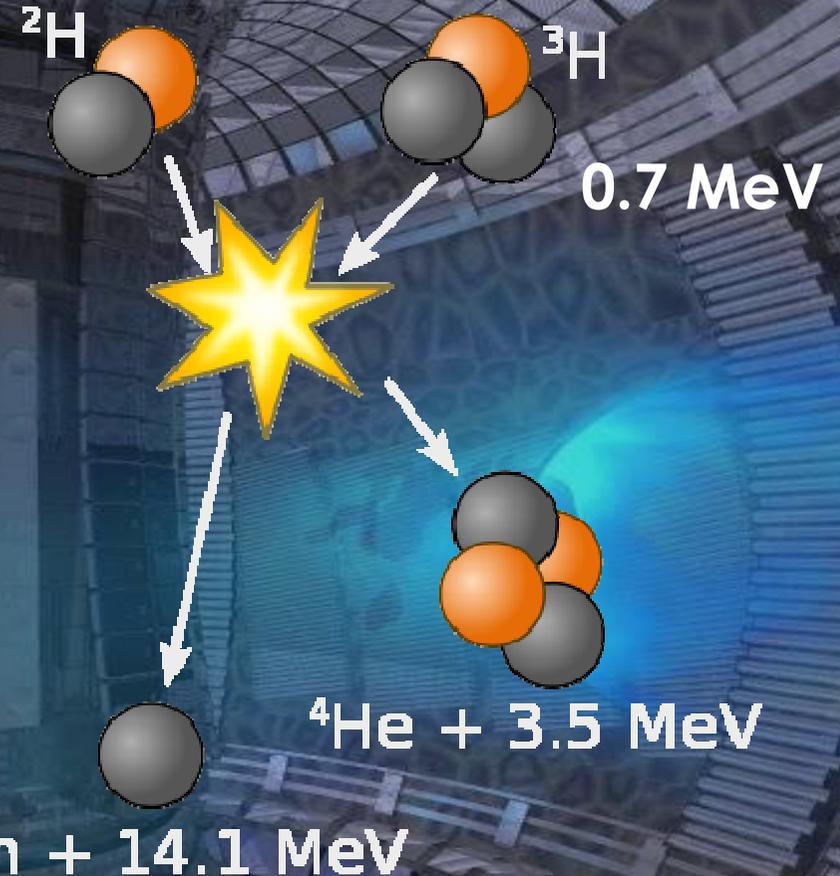
LA FUSION PEUT ÊTRE OBTENUE À PARTIR DE DIFFÉRENTES COMBINAISONS DE NOYAUX LÉGERS.

EN L'ÉTAT PRÉSENT DE LA TECHNOLOGIE, C'EST LA RÉACTION DEUTÉRIUM + TRITIUM (ISOTOPES DE L'HYDROGÈNE) QUI EST LA PLUS ACCESSIBLE.

LA MASSE H_2+H_3 EST SUPÉRIEURE À LA MASSE He_4+n

LES TOKAMAKS* SE SONT IMPOSÉS DÈS LA FIN DES ANNÉES 60 COMME LES PLUS PERFORMANTES DES MACHINES DE FUSION.

** Acronyme russe: Chambre toroïdale, bobines magnétiques*



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

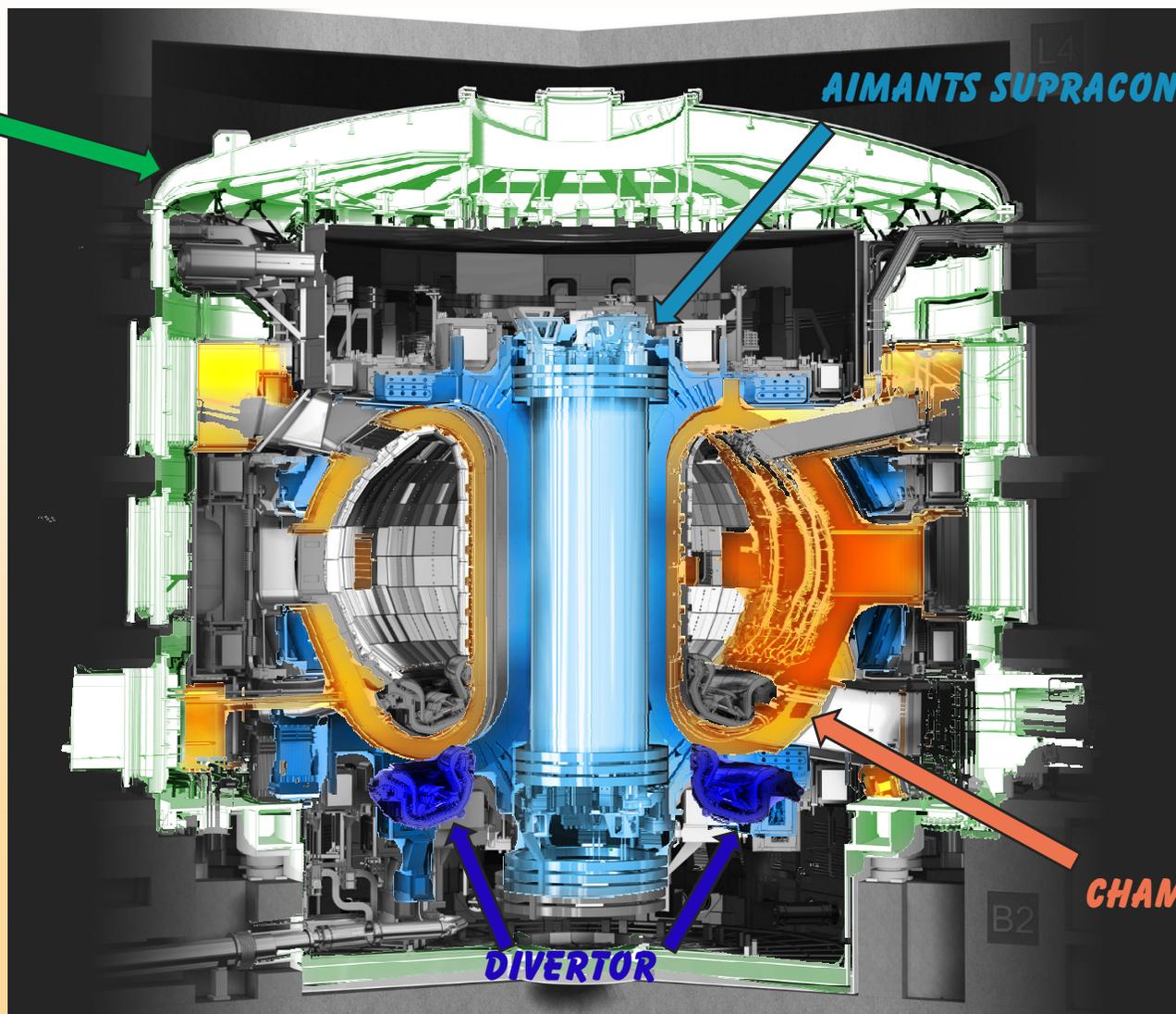


- Chine,
- Corée,
- Inde,
- Japon,
- Russie
- Etats-Unis
- Union européenne

Le réacteur expérimental ITER

LE CRYOSTAT

- TEMPÉRATURE PLASMA > 150 MILLIONS DE DEGRÉS
- 10 000T D'AIMANTS REFROIDIS À 4°K
- 100 000 KM DE BRINS SUPRACONDUCTEURS
- POIDS TOTAL 23 000T (3,5 FOIS LA TOUR EIFFEL)



AIMANTS SUPRACONDUCTEURS

DIAMÈTRE EXT. : 19M

HAUTEUR : 11M

VOLUME CHAMBRE À VIDE: 1000 M3

CRYOSTAT 16000 M3

CHAMBRE À VIDE

DIVERTOR

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 XXI^{ème} siècle.

ITER – le chantier mi-2019



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

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

Marie Curie

Merci pour votre attention