

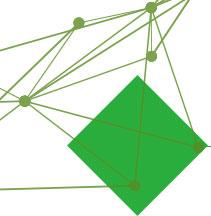


Thorium

-une énergie illimitée sans carbone.

Maurice Bourquin

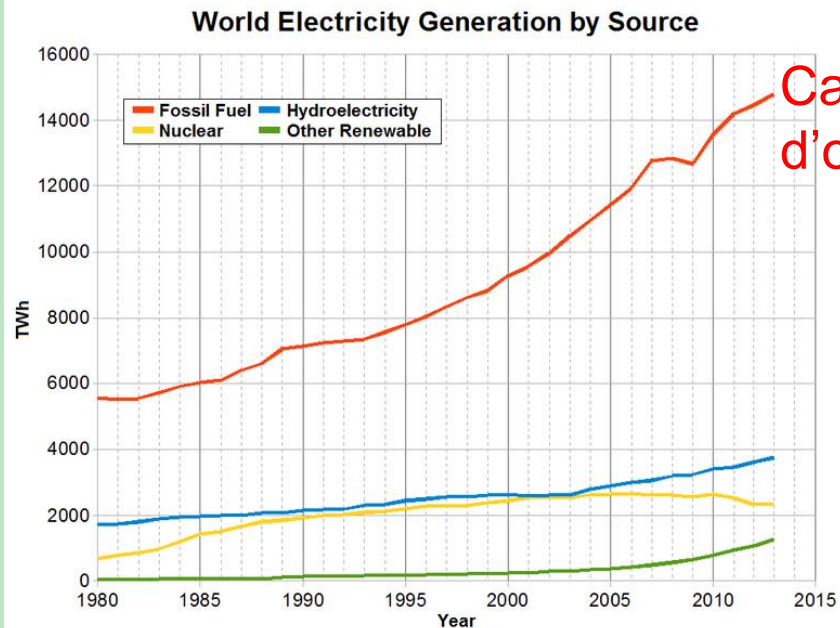
Société Valaisanne de Physique, Sion, 22 mars 2019



D'ici à 2050, la demande globale en électricité devrait augmenter d'environ 60% (Chine, Inde, Afrique...)

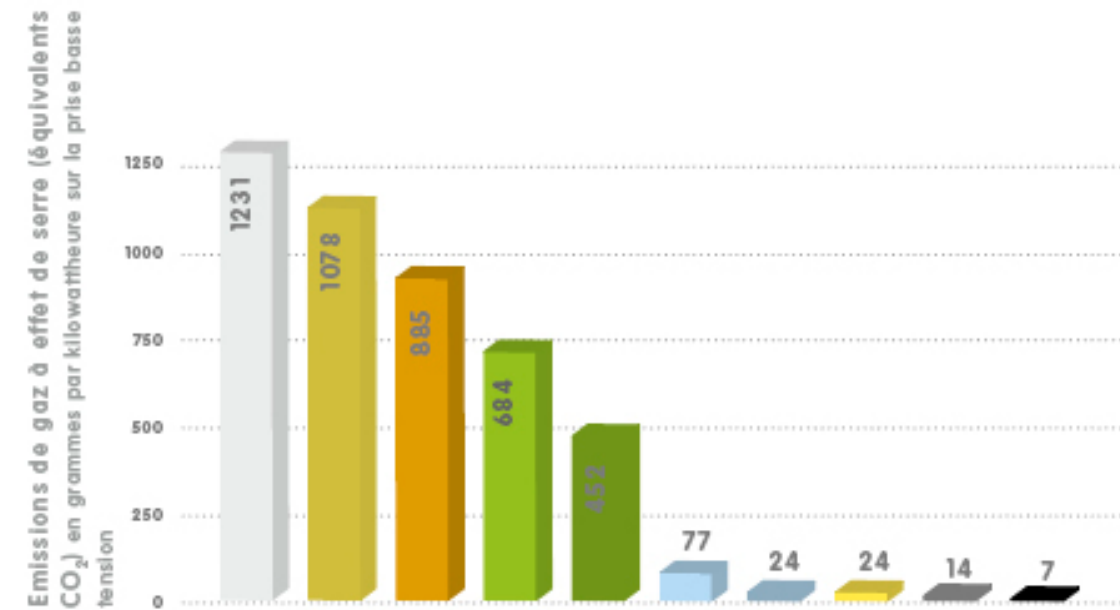


Carburants d'origine fossile et intermittence des nouvelles énergies renouvelables



Carburants
d'origine fossile

Emissions de gaz à effet de serre



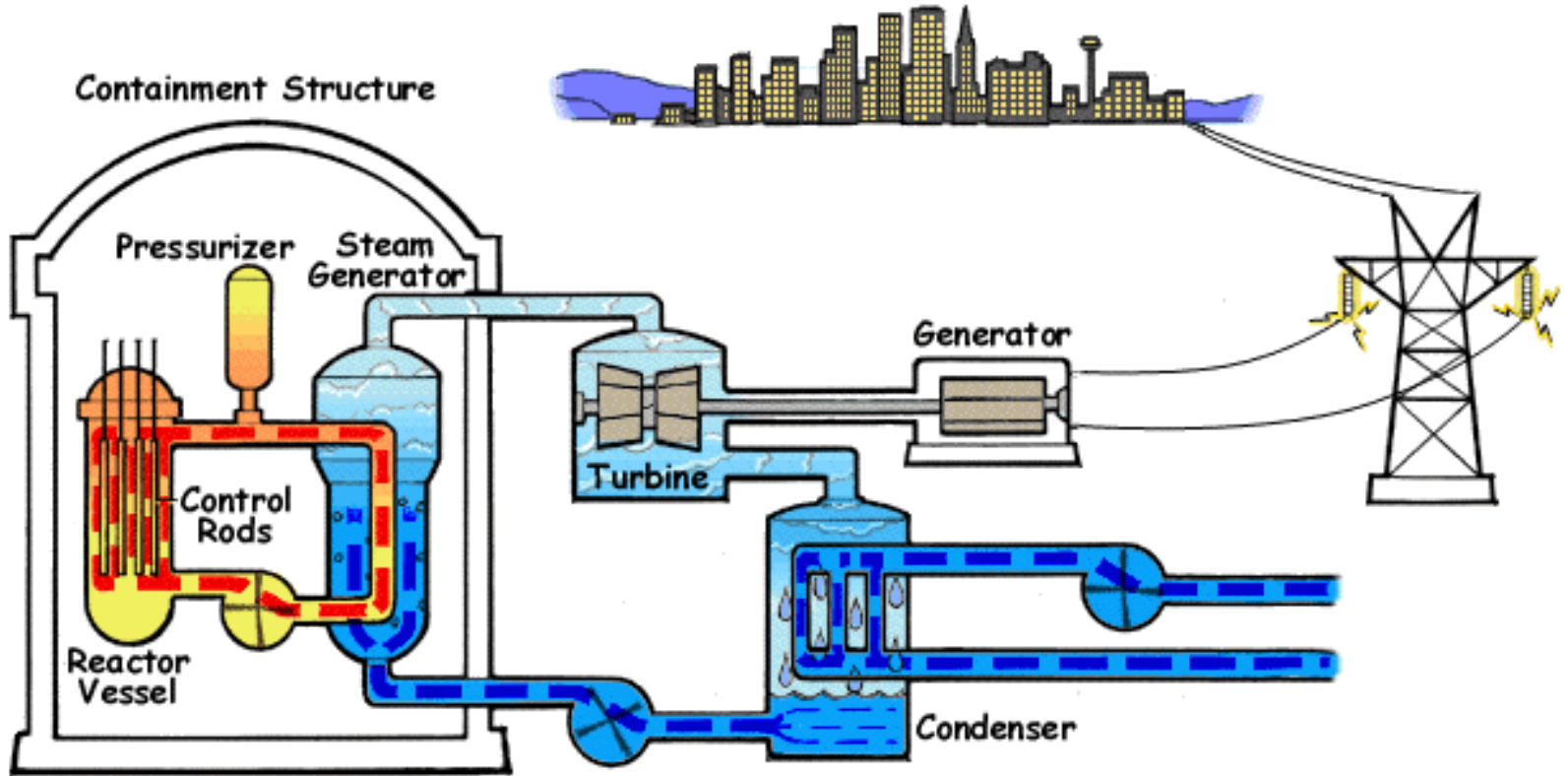
- Lignite
- Houille
- Pétrole
- Gaz naturel
- Cycle combiné gaz
- Photovoltaïque
- Vent
- Nucléaire
- Hydraulique
- Usines d'incinération des ordures ménagères

**Carburants
d'origine fossile**

Nucléaire

Sources: PSI/ESU (2011)

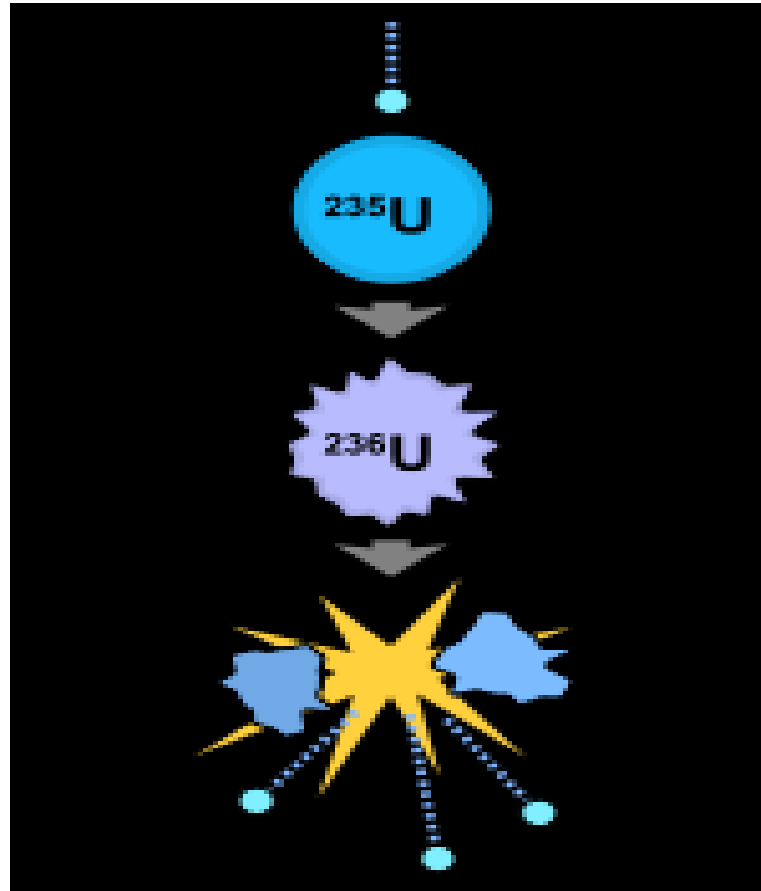
Eléments d'un réacteur refroidi à l'eau



^{235}U

Source:Wikipedia

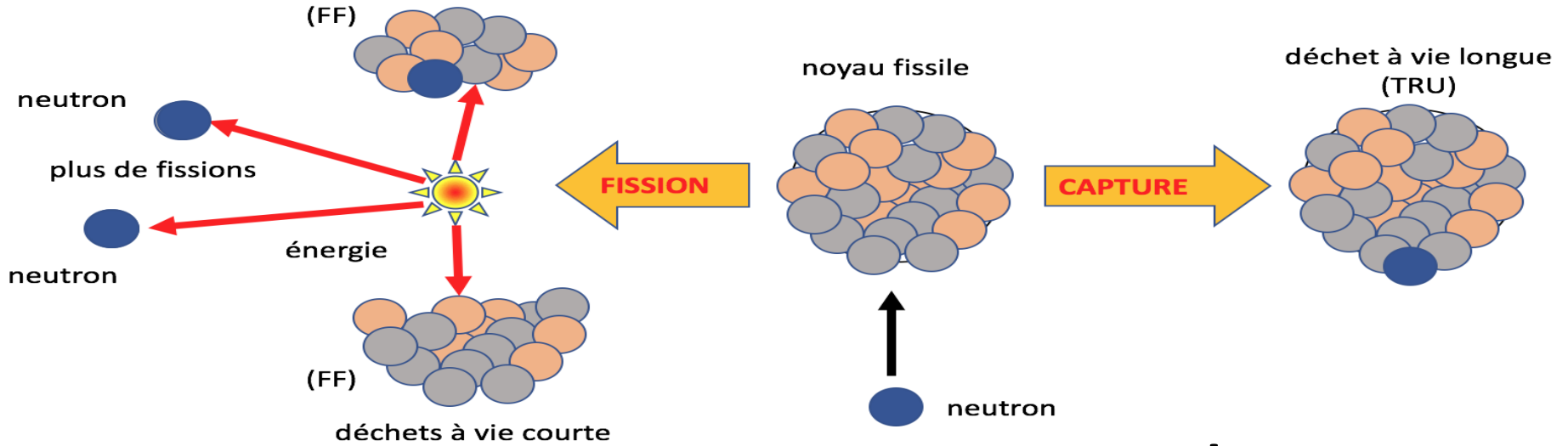
Un processus de fission inefficace



Source:Wikipedia



Les déchets du combustible uranium

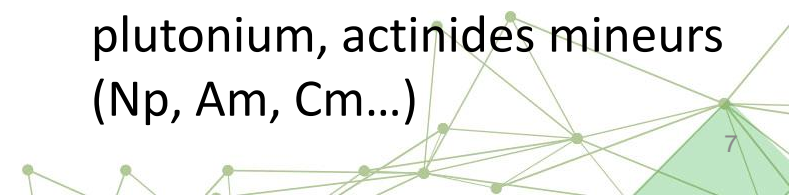


Déchets de haute activité:

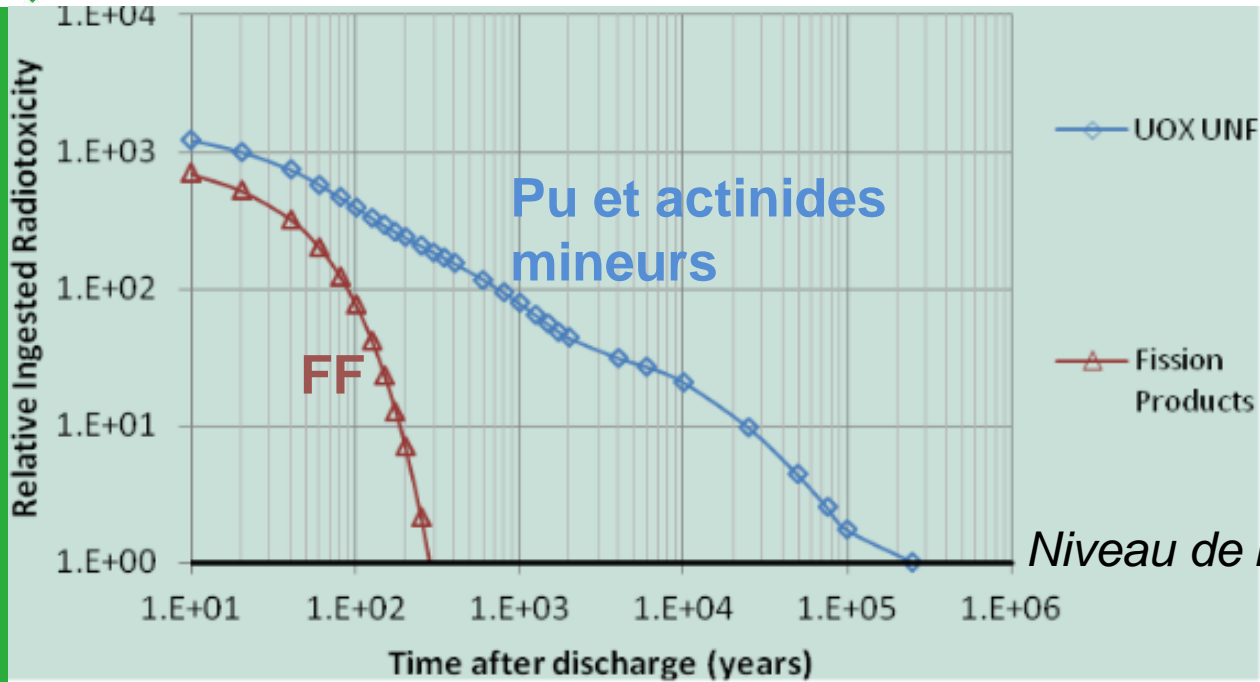
Fragments de fission

Elements transuraniens:

plutonium, actinides mineurs (Np, Am, Cm...)



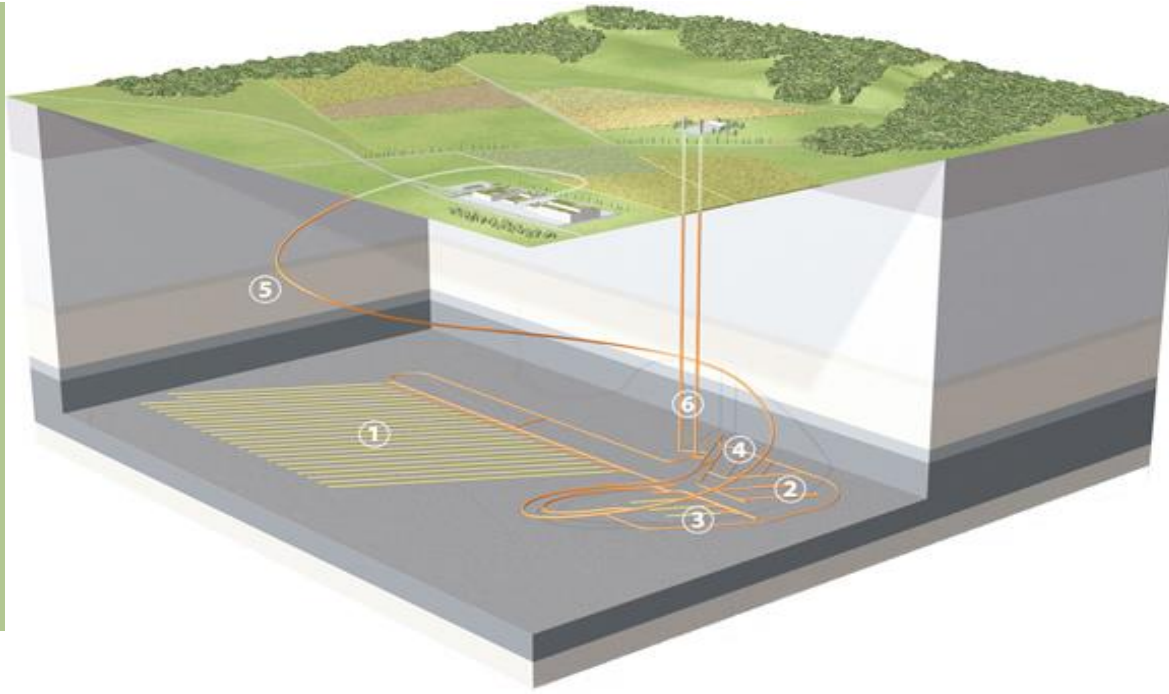
La vie longue des déchets de l'uranium



Niveau de l'uranium naturel

Yasir Arafat et al.,
Westinghouse Electric Company

Enfouissement géologique profond des déchets à vie longue

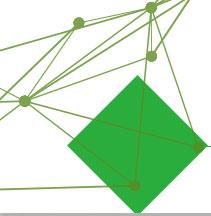


Chaleur et radioactivité

Demi-vies:

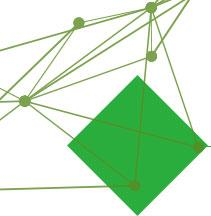
Strontium-90 et césium-137 environ 30 ans

Plutonium-239 24,000 ans,
Np, Am, Cm



La réalité de Marthalen





WOHIN MIT DEN RADIOAKTIVEN ABFÄLLEN?



Bundesrätin
Doris Leuthard zu Besuch
in der Standortregion
Zürich Nordost



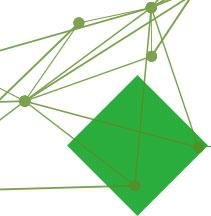
Mittwoch, 11. November 2015
19 Uhr, Marthalen
Mehrzweckhalle, Zinggstrass 18



ARGUMENTS AGAINST-

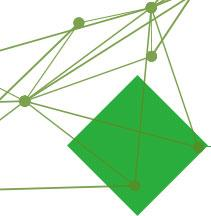


Jo Heller ©2011 GREENBAY PRESS-GAZETTE



Une solution pour la gestion des déchets nucléaires





*Le passé, le présent et le future de l'humanité:
notre Terre, notre héritage.*



La production d'énergie avec $E=mc^2$



**Fission de l'uranium
(ou du plutonium)**

**Régénération avec
le thorium**

La place du thorium dans le tableau périodique

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
Period 6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Period 7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
				* 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
				* 90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

thorium

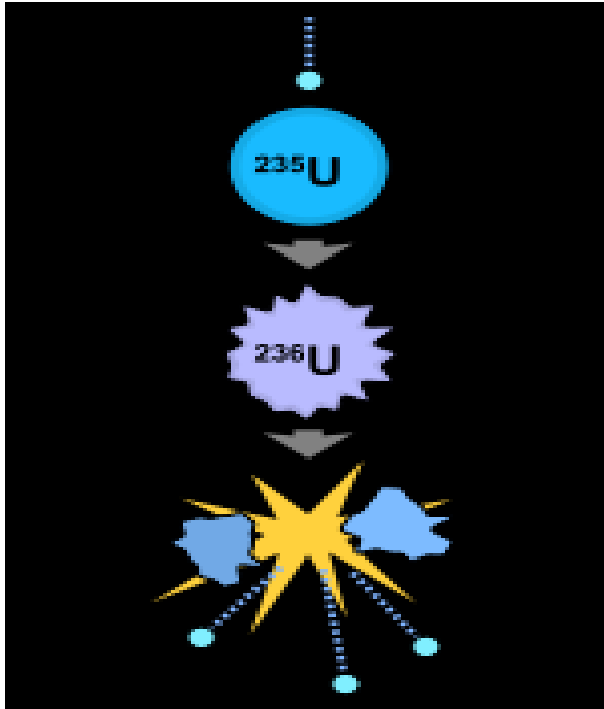


uranium

La production d'énergie avec $E=mc^2$

Fission de l'uranium

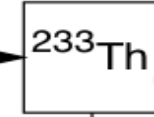
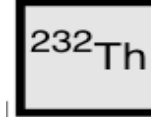
fissile



Régénérateur au thorium

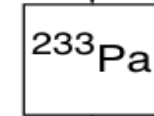
Fertile
Pas fissile

Capture de neutron



Demi-vie
22.3 min

τ_2



Demi-vie
27 jours

τ_3

σ_f



fissile

Pour produire en continu 1 GWe pendant une année:
3,500,000 tonnes de charbon ou
200 tonnes d'uranium naturel ou
une tonne de thorium





Monazite

credit P.K. Wittal, BARC, India

Le thorium constitue une source non encore exploitée, disponible mondialement.

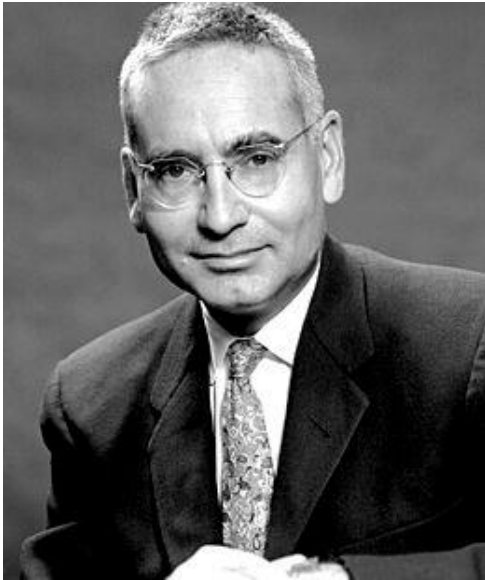
Country	Tonnes
India	846,000
Brazil	632,000
Australia	595,000
USA	595,000
Egypt	380,000
Turkey	374,000
Venezuela	300,000
Canada	172,000
Russia	155,000
South Africa	148,000
China	100,000
Norway	87,000
Greenland	86,000
Finland	60,000
Sweden	50,000
Kazakhstan	50,000
Other countries	1,725,000
World total	6,355,000

OECD/IAEA/
Uranium
2014



Conteneurs de nitrates de thorium au Nevada

L'utilisation du thorium a été démontrée avec succès au
Oak Ridge National Laboratory
et à la Shippingport Atomic Power Station (1960's)



Alvin Weinberg

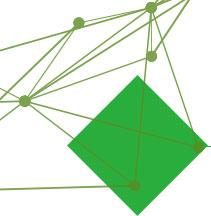




Trois avantages essentiels des centrales au thorium

- i) **Le cœur ne peut pas fondre** comme à Fukushima (le fluide caloporteur n'est pas de l'eau sous pression, mais du sel fondu ou du plomb fondu, chimiquement stable, fonctionnant à pression atmosphérique).
- ii) **Elles pourront fonctionner de manière continue pendant 5 à 10 ans**, sans accès au combustible.
- iii) **Elles produisent beaucoup moins de déchets radioactifs**, sans plutonium ni actinides mineurs, et ainsi peuvent remplir le critère de déchets restant radioactifs pendant a maximum de 300 ans.

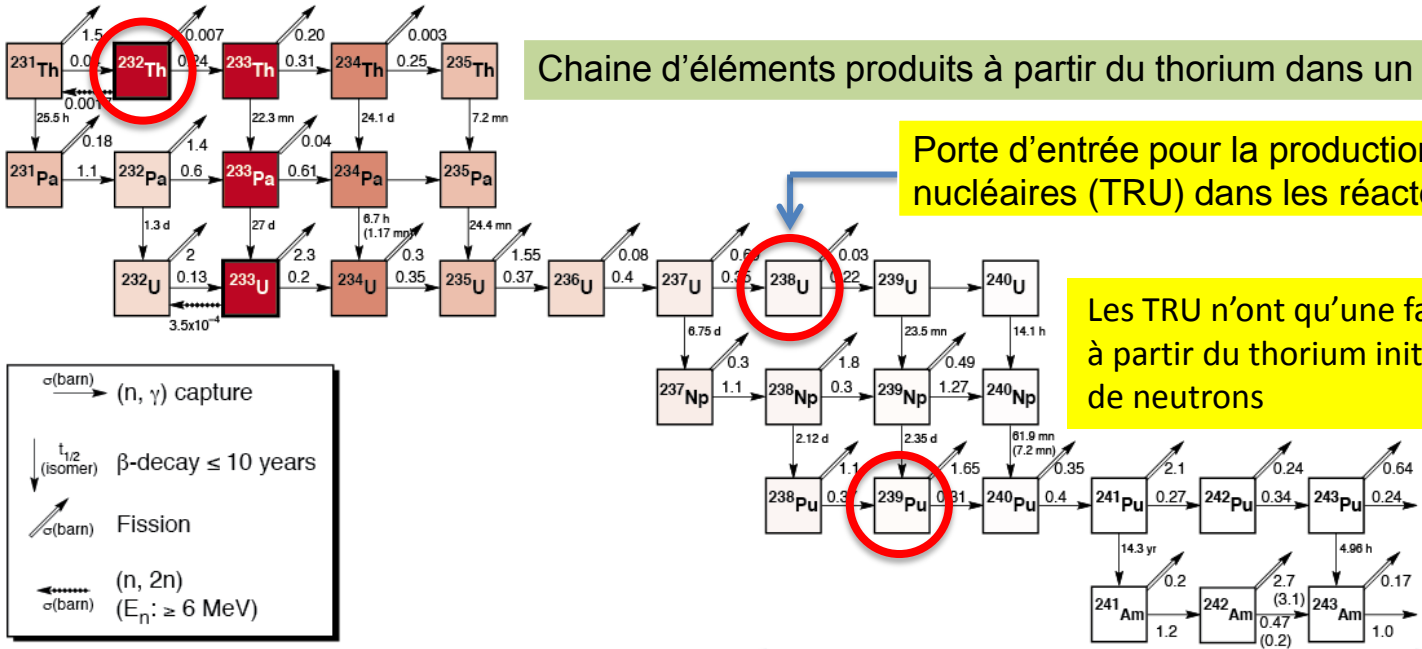
Un combustible qui minimise la production de déchets



Chaîne d'éléments produits à partir du thorium dans un flux de neutrons rapides

Porte d'entrée pour la production des déchets nucléaires (TRU) dans les réacteurs actuels (REP)

Les TRU n'ont qu'une faible probabilité de production à partir du thorium initial, car éloignés par 7 captures de neutrons

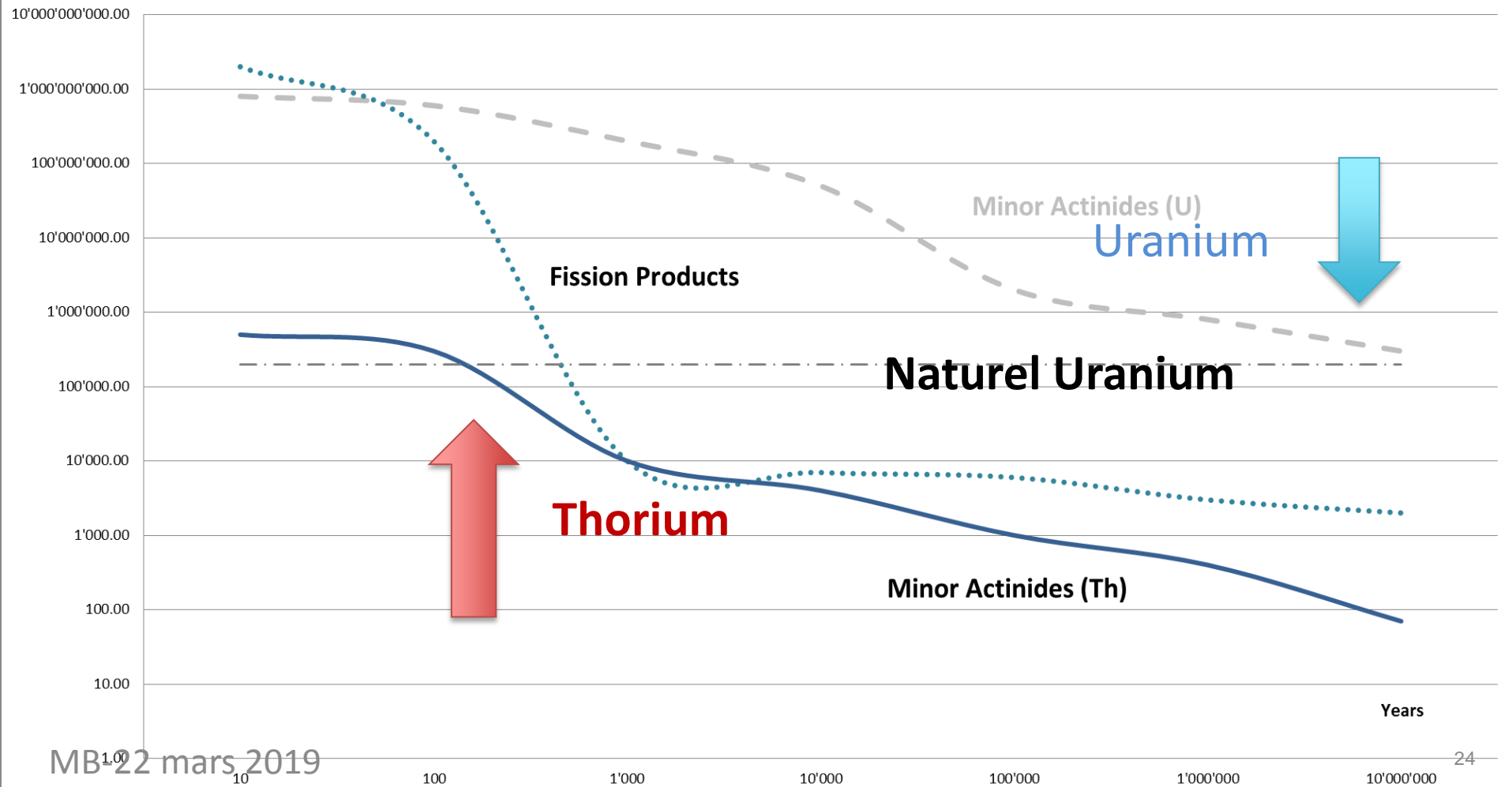


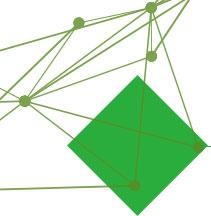
$\sigma(\text{barn}) \rightarrow$ (n, γ) capture
 \downarrow $t_{1/2}$ (isomer) β -decay ≤ 10 years
 \nearrow $\sigma(\text{barn})$ Fission
 \leftarrow $\sigma(\text{barn})$ (n, 2n) ($E_n \geq 6$ MeV)

Transuraniens (TRU)



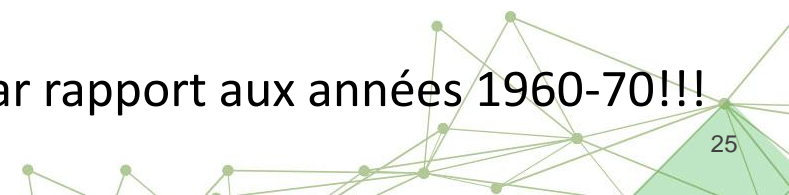
Waste Radiotoxicity as a function of time





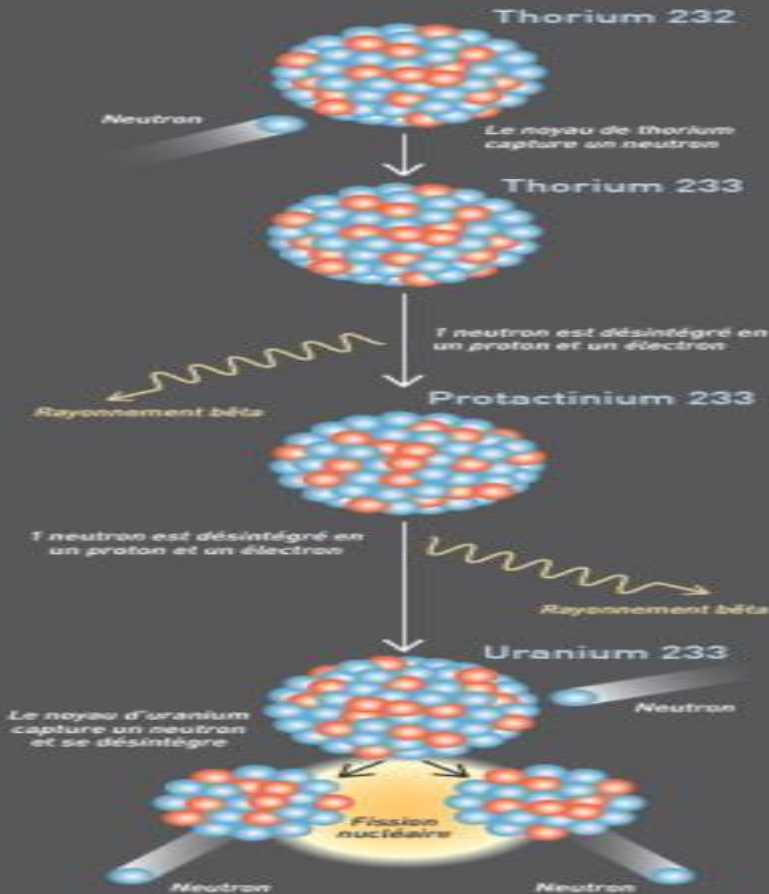
Technologie abandonnée en 1972 , car les USA étaient plus intéressés à produire des armes nucléaires que de l'énergie

- La production de plutonium militaire nécessite des réacteurs (régénérateur) à l'uranium
- Mais **aujourd'hui** le Th représente un avantage si l'on veut limiter la prolifération des armes nucléaires.
- Et le Th offre **aujourd'hui** une solution viable pour produire de l'énergie à partir d'une réaction nucléaire:
 - nouveaux matériaux
 - nouveaux moyens de calcul du 21^e siècle par rapport aux années 1960-70!!!



Energie de fission avec ^{232}Th

Production d'uranium à partir de thorium



Comment produire les neutrons initiaux ?

Le programme thorium indien



La situation en Inde:

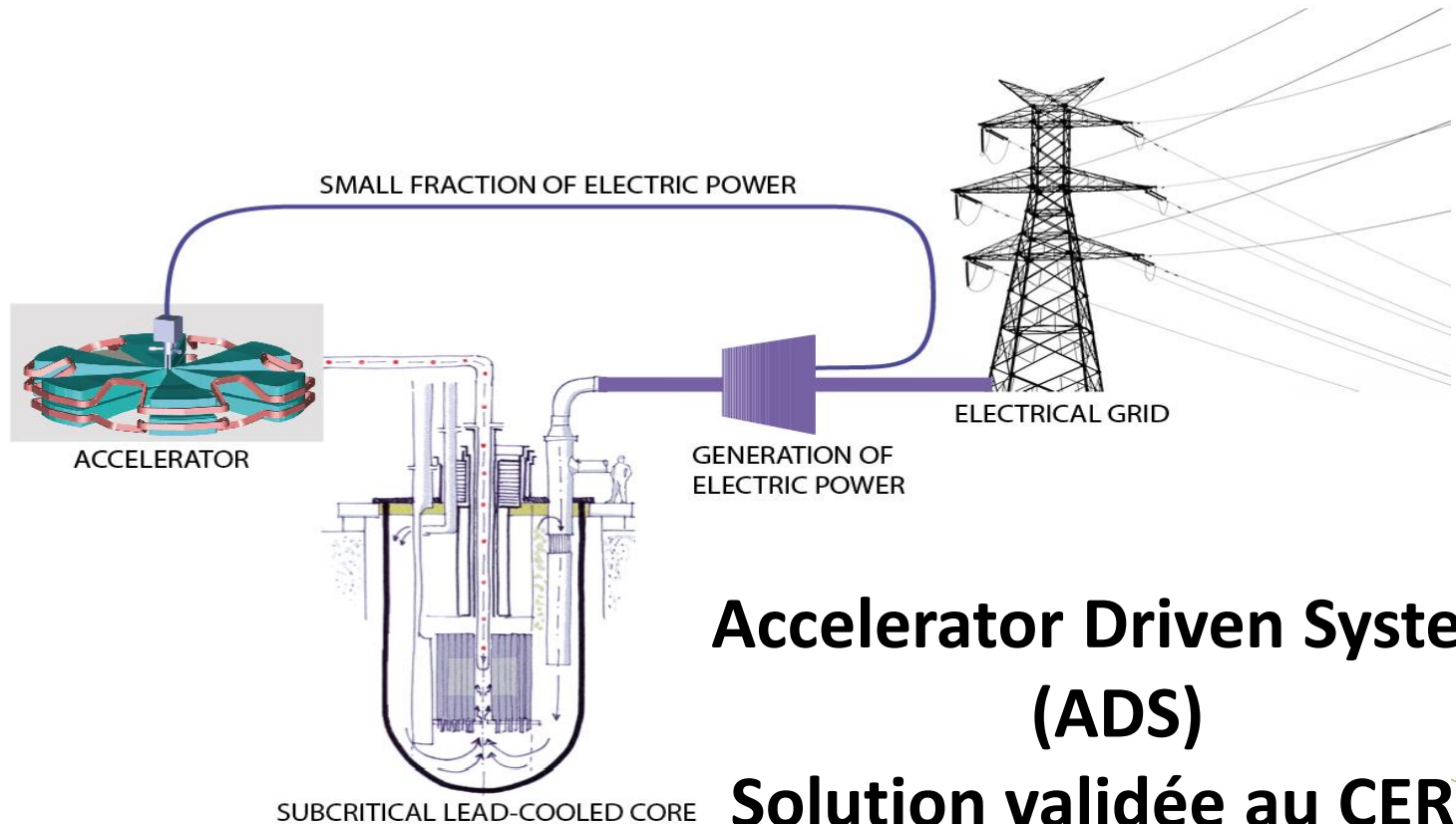
- Un défi énergétique colossal
- Investissements massifs dans le nucléaire
- D'importantes réserves de thorium

Comment éviter Pu?
Comment éviter sodium?

Le programme:

- Utiliser les réacteurs refroidis à l'eau pour produire du plutonium
- Construire des réacteurs rapides U-Pu refroidis au sodium avec du thorium pour produire de U-233
- Retraiter le combustible pour produire du combustible U-233/Th pour des réacteurs avancés rapides

Une solution ingénieuse: piloter le réacteur par un accélérateur



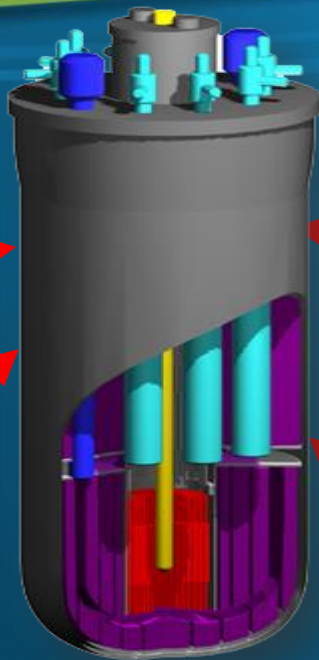
**Accelerator Driven System
(ADS)**

Solution validée au CERN

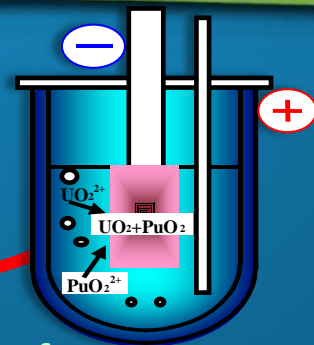
Tous les éléments de base d'un ADS ont été testés séparément



High power
accelerators
technology



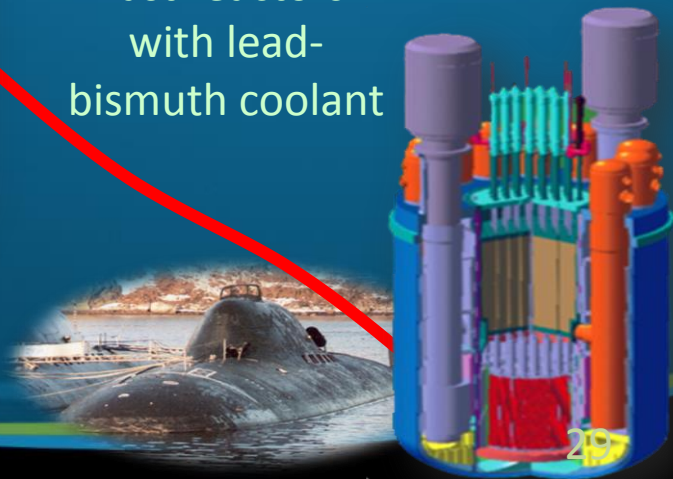
Technology of
pyroelectro
reprocessing of
fuel



Technologies of
fast reactors
with lead-
bismuth coolant



Liquid metal
targets
technology





Trois avantages d'un ADS au thorium

1. Sécurité

- ◆ Elimination des accidents de criticité en gardant le système **sous-critique**: sécurité inhérente par l'arrêt immédiat de l'accélérateur.
- ◆ Eviter les liquides de refroidissement dangereux comme l'eau ou le sodium liquide (utiliser du **plomb fondu**).

2. Résistance à la prolifération

- ◆ Le combustible thorium produit peu de plutonium.
- ◆ L' ^{233}U produit n'est pas susceptible d'être un matériel pour une bombe atomique, à cause de la présence d' ^{232}U .
- ◆ Utiliser le retraitement pyro-électrique (extraire ensemble tous les TRU)

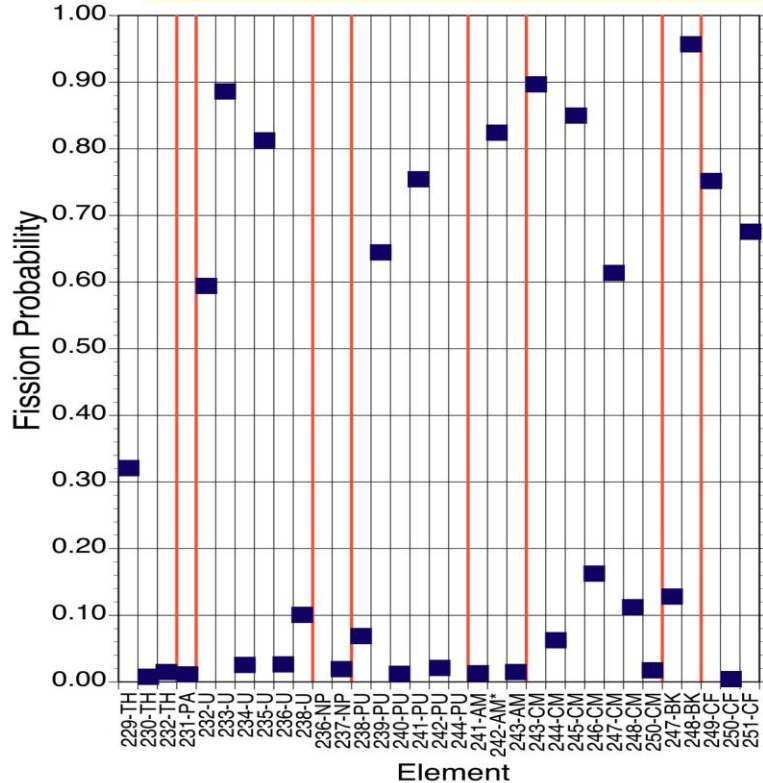
3. Traitement des déchets

- ◆ Les ADS acceptent des combustibles comprenant des actinides mineurs et du plutonium sans compromettre leur sécurité
 - **Permet d'éliminer par fission les déchets de vie longue des réacteurs conventionnels.**

Probabilités de fission des éléments transuraniens

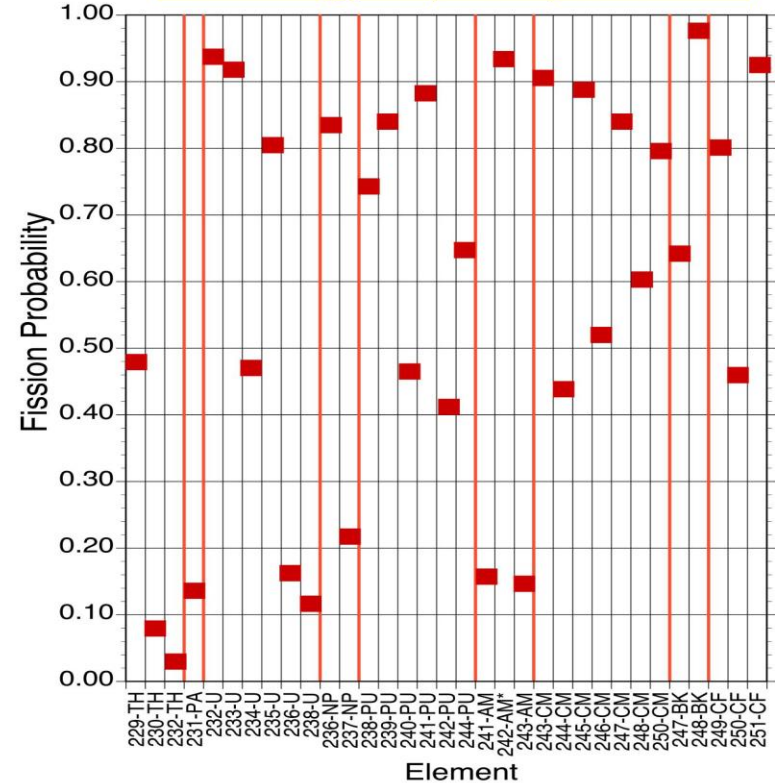
Thermal Neutrons

PWR Spectrum (ORIGEN, ORNL-4628)



Fast Neutrons

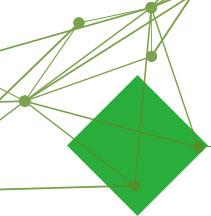
Fast Energy Amplifier Spectrum



**Ils peuvent neutraliser les déchets radioactifs existants , comme le plutonium, réduisant leur radiotoxicité d'environ 300'000 ans à moins de 300 ans, tout en produisant de l'électricité
($G=G_0/1-k= 30$ à 100)**

ADANES, Accelerator Driven Advanced Nuclear Energy System, CAS, China





ADANES, Accelerator Driven Advanced Nuclear Energy System, CAS, China

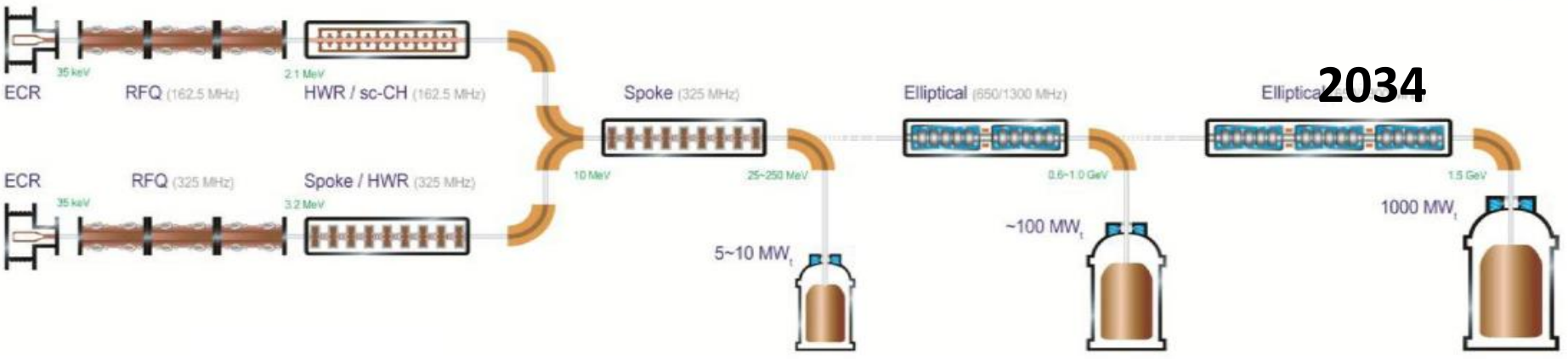


2010

2016

2022

2034



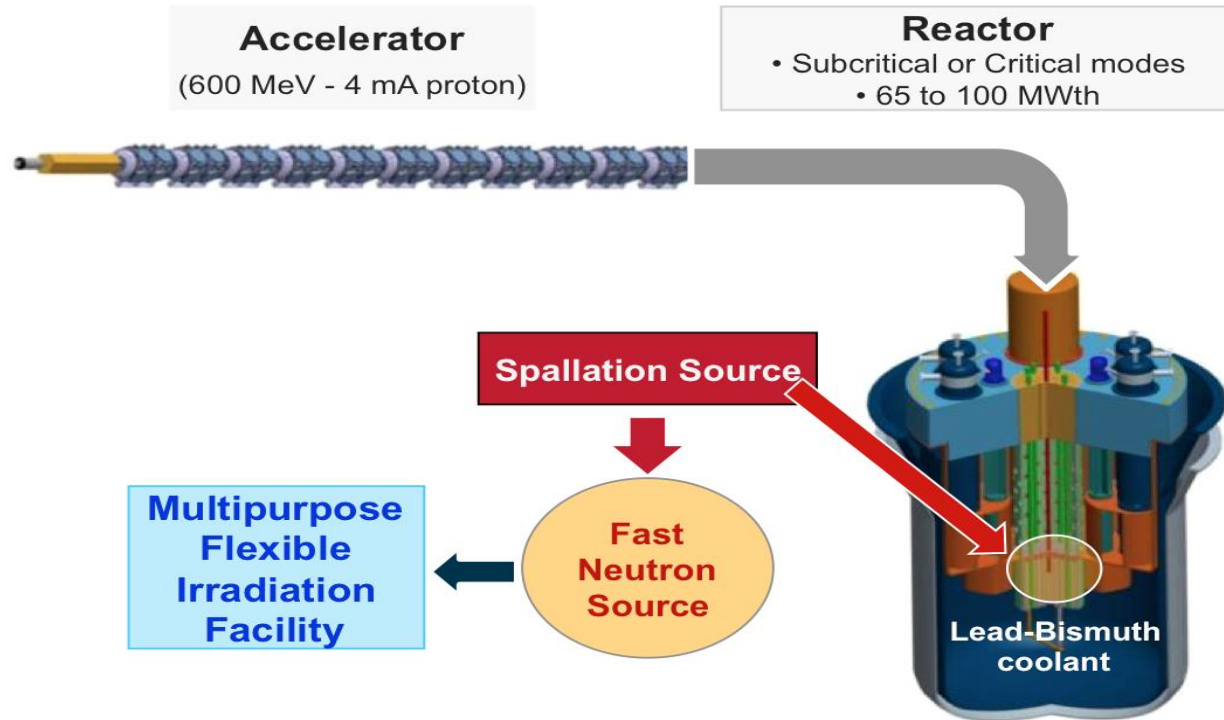
CIADS: INITIAL FACILITY

250MeV@10mA
5-10MW

RESEARCH FACILITY

DEMO FACILITY

MYRRHA, réacteur de recherche hybride et multifonctionnel pour applications innovantes, Belgique





international Thorium Energy Committee (iThEC)

- ◆ **Association à but non lucratif, régie par la loi suisse, fondée en 2012**
- ◆ **Objectif: Promouvoir la R&D dans l'utilisation du thorium**
 - Transmutation des déchets nucléaires
 - Production d'énergie sûre, propre et abondante
 - Autres applications industrielles (production de radio-isotopes pour la médecine (Ra-224, Pb-212), production d'hydrogène, etc.)
- ◆ **Membres:** Physiciens, ingénieurs, politiciens et autres citoyens sensibles à la problématique de l'énergie.

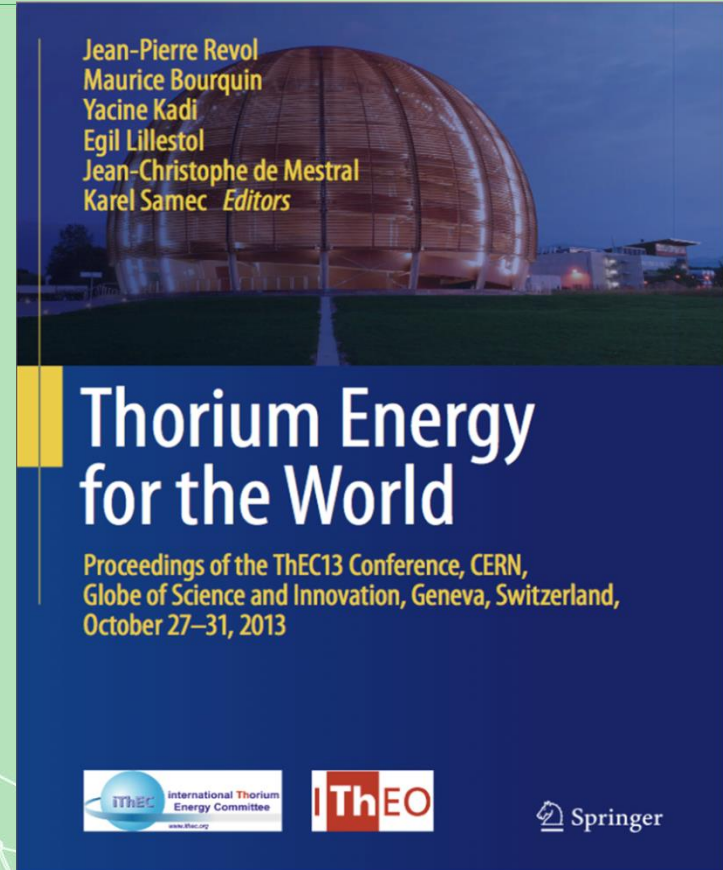
1. Thorium Energy for the World



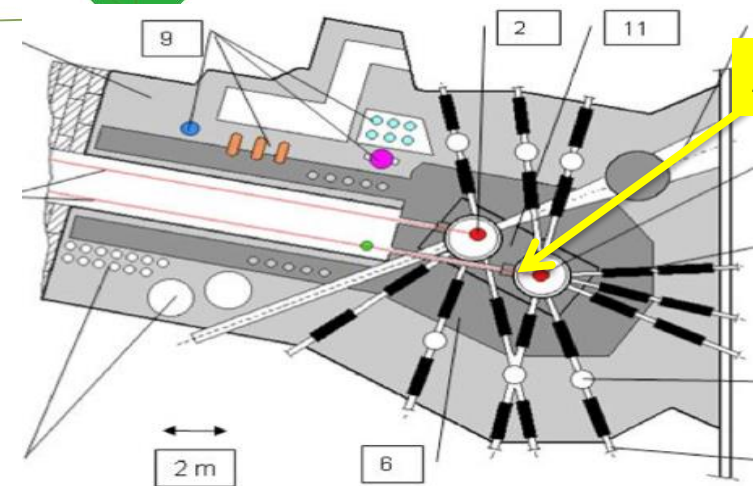
- ◆ «Le futur énergétique de la planète est un enjeu politique et scientifique. Les deux sont inséparables.»



www.springer.com/gb/book/9783319265407



2. Premier ADS à neutrons rapides et puissance substantielle à INR Moscou

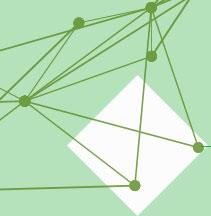


ADS experimental cell



The existing INR Infrastructure

- proton linear accelerator (≤ 600 MeV, ≤ 300 kW)
- Spallation neutron source
- Pit on a beam line to receive a **subcritical core**
- Infrastructure to manipulate highly radioactive material

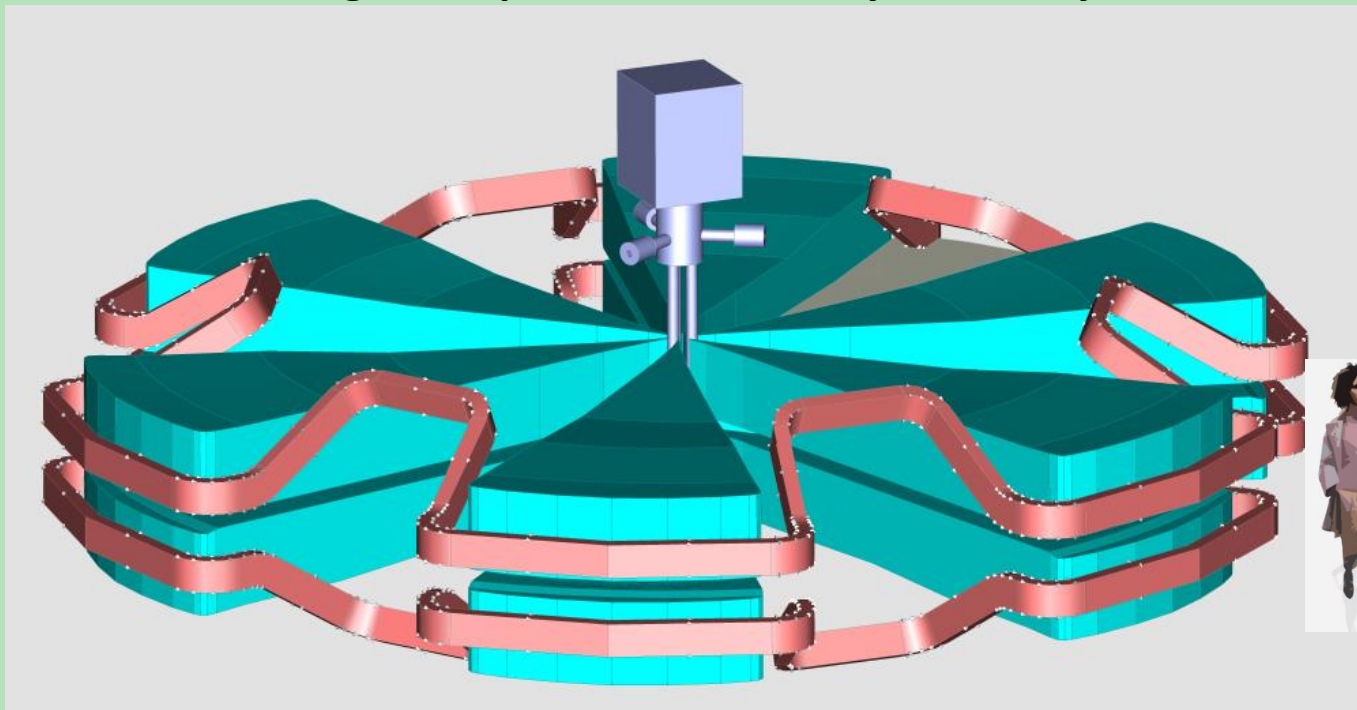


3. *CYCLotron for ADS (CYCLADS)* *soumis pour financement à H2020 et EURATOM*

Innovative design: compactness, efficiency, reliability, lower cost

CYCLADS Consortium:

- AIMA Development*
- ASG Superconductors*
- CERN*
- ENEA*
- HNE*
- INFN Catania & Genova*
- iThEC*
- N-21*
- PSI*



4. Démontrer la faisabilité technique et économique d'un ADS au thorium



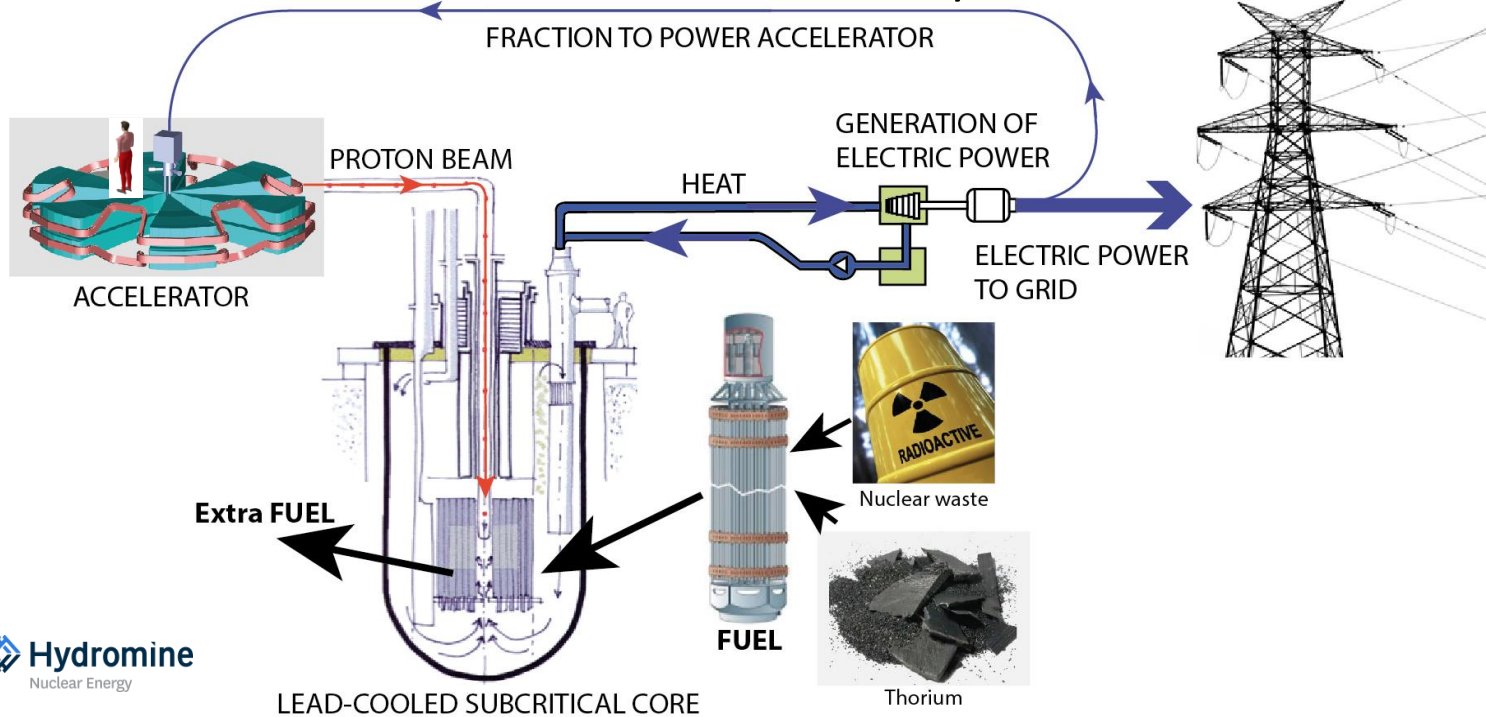
*La pression
environnementale,*



*L'énorme
problème des
déchets
nucléaires et
des stocks de
Pu militaire*

l'environnement législatif favorable aux USA:
“Nuclear Energy Innovation Capabilities Act”

Projet concret de démonstrateur aux USA qui puisse mener à un développement industriel (accélérateur, cible de spallation, cœur sous-critique, combustibles au thorium et AM, validation, coûts, étude du marché...)



A la recherche d'un investissement privé



Merci



Maurice.Bourquin@unige.ch

<http://ithec.org/en/organisation/>

<https://www.sps.ch/fileadmin/doc/Mitteilungen/Mitteilungen.54.pdf>