

Le THORIUM

**pour produire de l'énergie sans carbone,
en réduisant les déchets nucléaires**

Maurice Bourquin

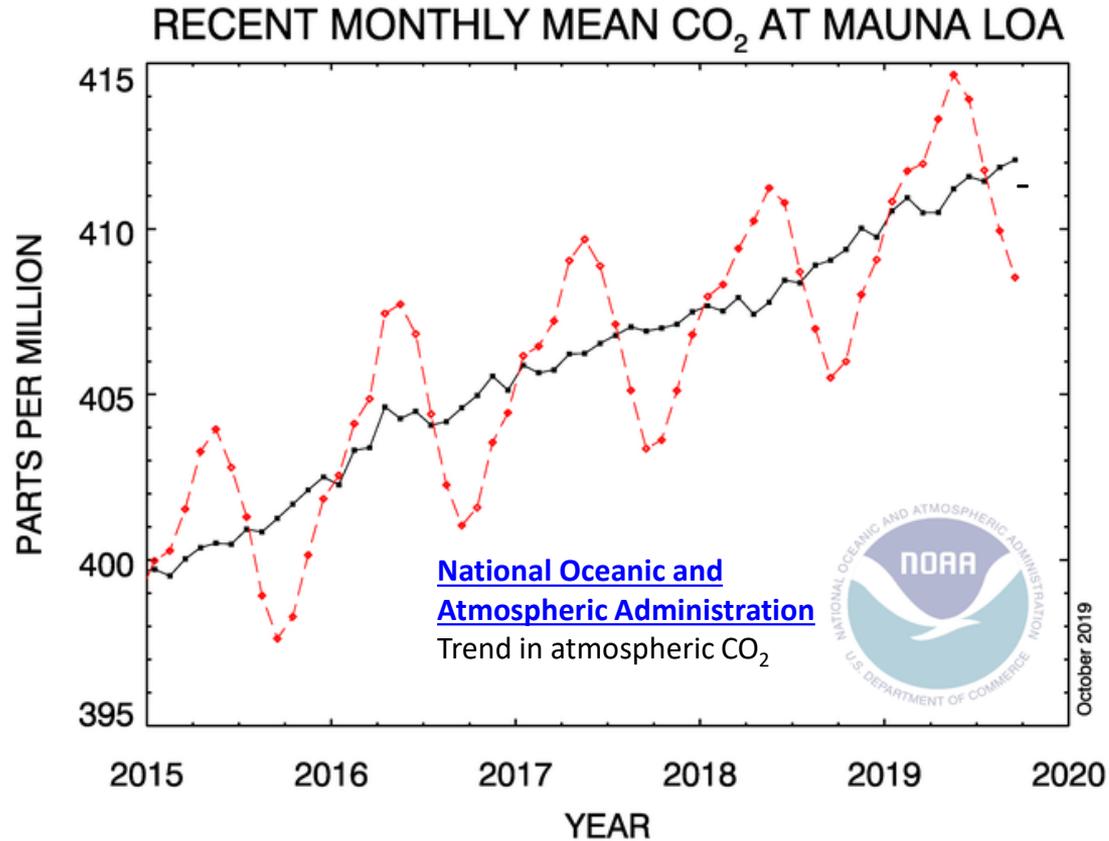
Professeur honoraire, Université de Genève, Suisse

Présenté à l'Université des Antilles
Vendredi 13 mars 2020



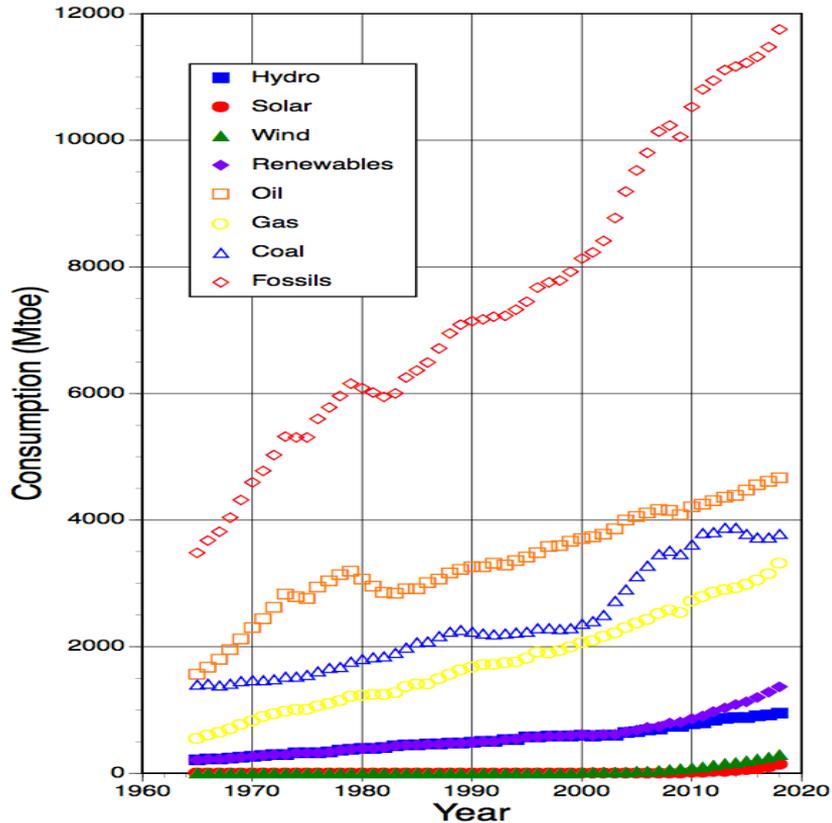
Les émissions mondiales de gaz à effet de serre augmentent

Le dioxyde de carbone (CO₂) joue le rôle majeur parmi les émissions

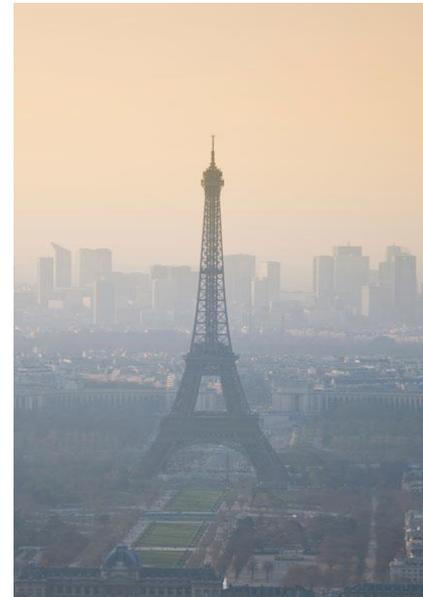


Consommation mondiale de combustibles

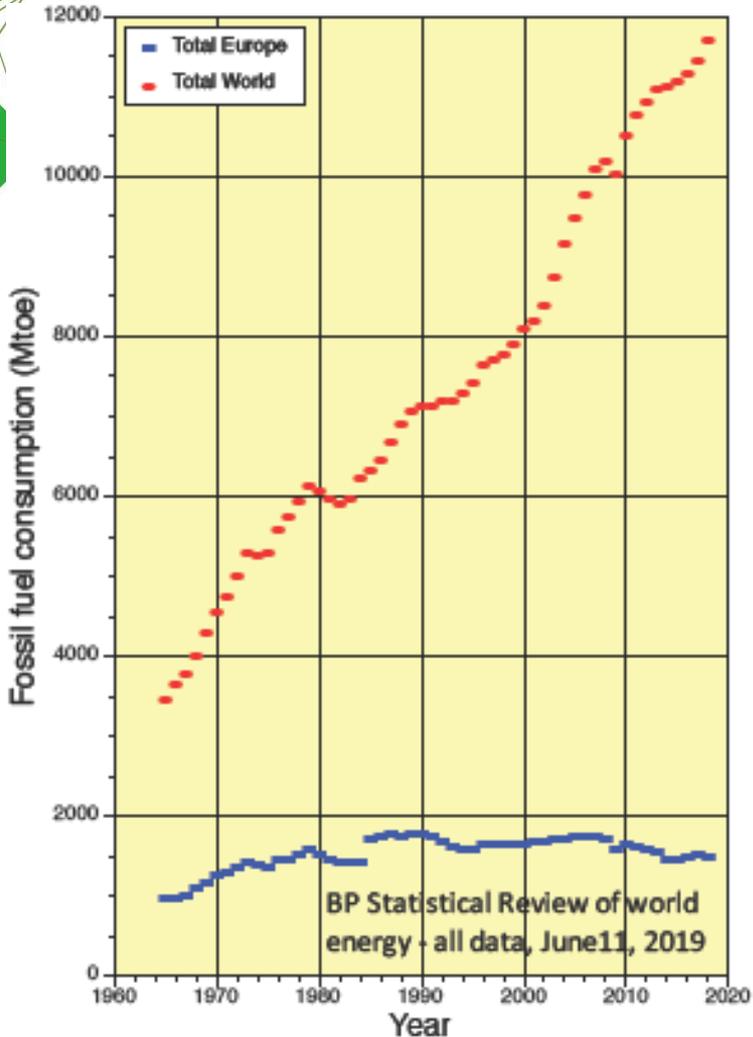
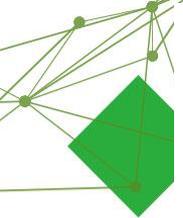
BP Statistical Review 2019, published in June 2019



GIEC: les combustibles d'origine fossile atteignent des niveaux tels qu'ils mettent en danger l'équilibre écologique de la planète, ainsi que notre santé



OMS:25'000 décès prématurés par jour dans le monde dus à la pollution atmosphérique



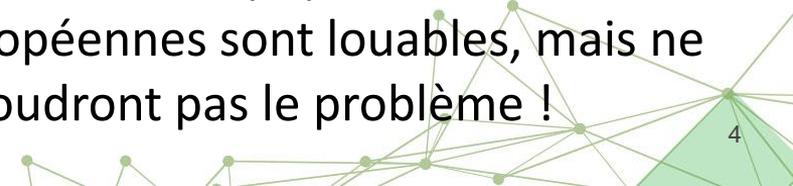
Le rôle de l'Europe

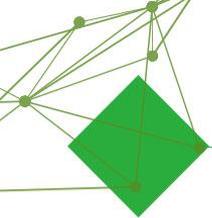
And a majority are willing to make changes to their own habits:



Problème global
⇒ solution globale

Les efforts des populations européennes sont louables, mais ne résoudre pas le problème !





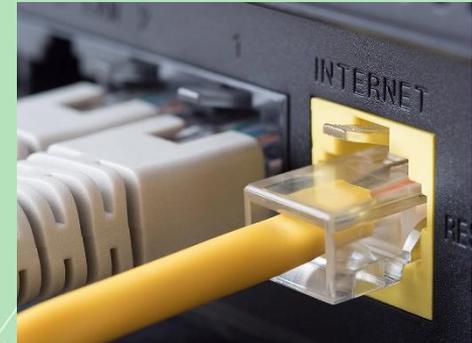
Une demande croissante en énergie dans le monde

- ◆ Le monde doit fournir un accès à l'énergie à plus d'un milliard de personnes qui en manquent (Chine, Inde, Brésil, Afrique, Pakistan, ...)
- ◆ Et d'ici 2050, répondre à la demande de deux milliards (?) de personnes supplémentaires
- ◆ Donc le recours aux énergies fossiles doit baisser, globalement, et être remplacées par des énergies n'émettant pas de gaz à effet de serre (et abordables)
 - -25% pour limiter l'augmentation de température moyenne à 2 degrés C

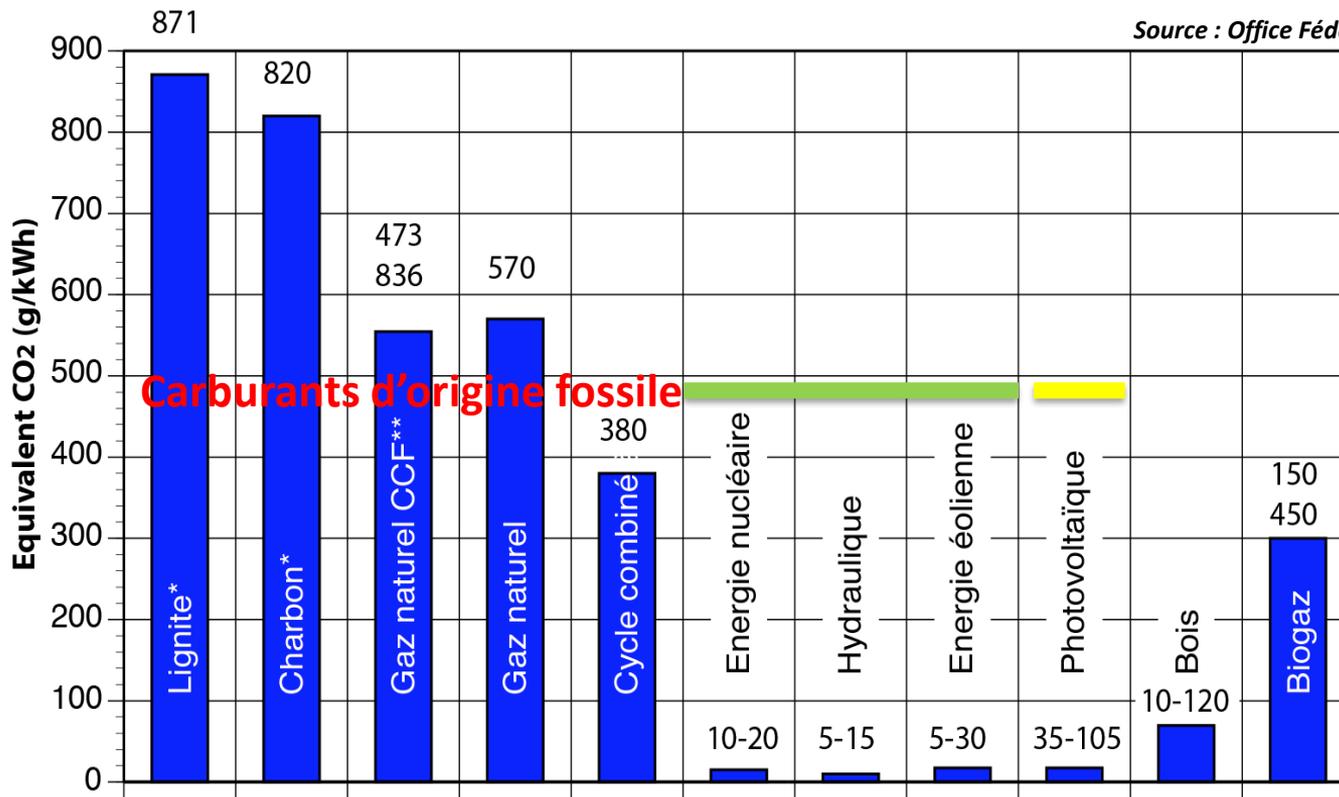
Fraction d'énergie produite sous forme d'électricité: 20%

mais augmente fortement:

- Pompes à chaleur, éclairage, climatisation, mobilité, appareils électroniques...
- Internet utilise actuellement environ 15% de l'électricité consommée dans le monde (produisant plus de CO₂ que tous les voyages en avion).



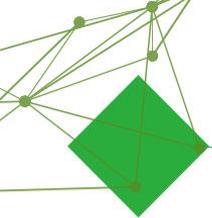
Emissions de gaz à effet de serre dans la production d'énergie (cycle de vie)



Carburants d'origine fossile

* Relative aux grosses centrales à gaz modernes avec gazéification du charbon

** Couplage chaleur-force



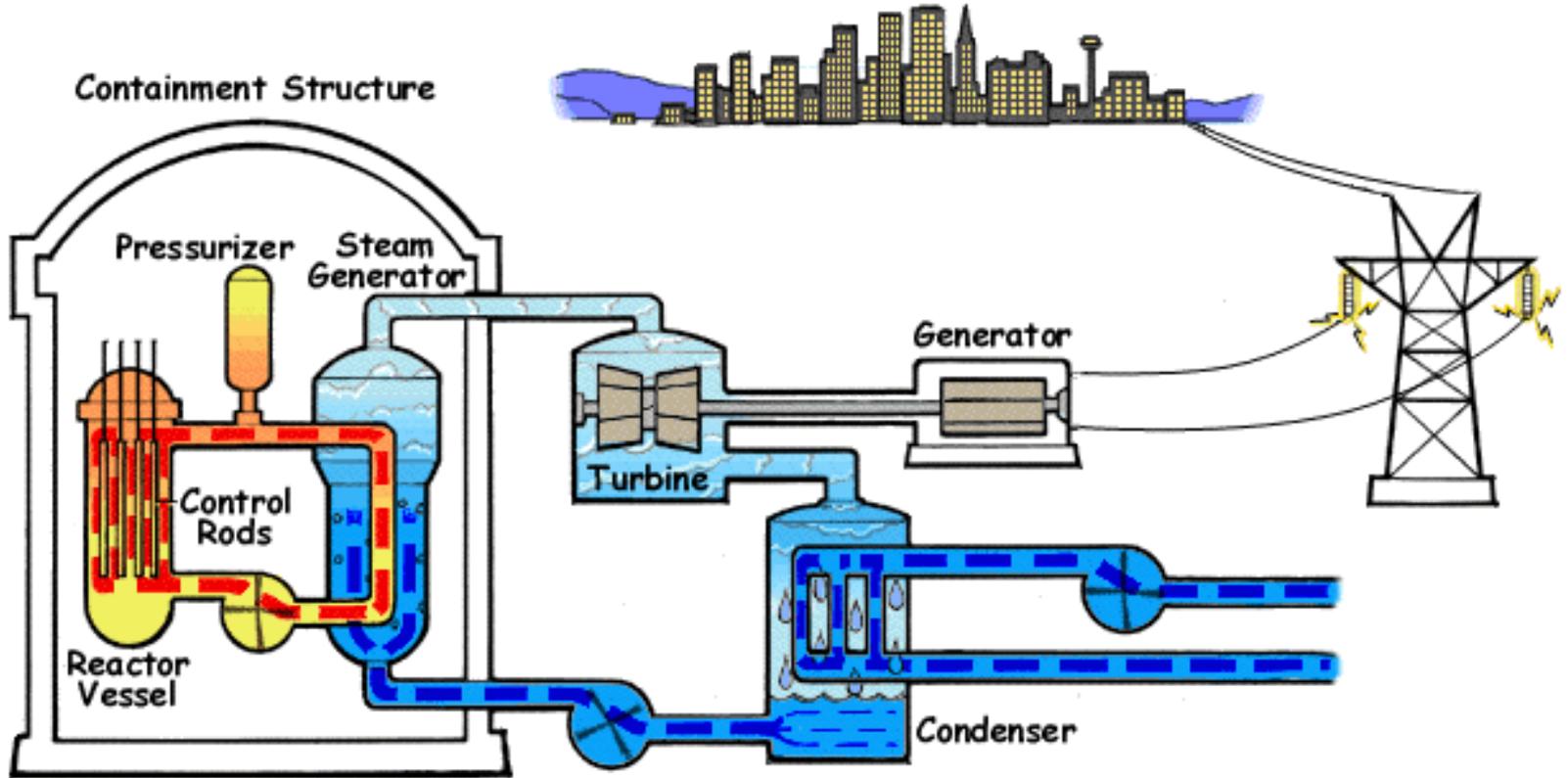
Le nucléaire pourrait jouer un rôle important pour réduire les émissions

Le nucléaire est une source abondante et intense d'énergie (pas de CO₂, production en ruban, implantable partout)

Problème : les centrales nucléaires actuelles à uranium n'ont pas de futur à long terme

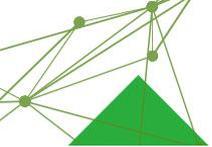
- Ressources d'uranium limitées
 - Risques d'accidents
 - Risques de prolifération des armes nucléaires
 - **Gestion des déchets radioactifs à vie longue non résolue**
- 

Eléments d'une centrale électrique

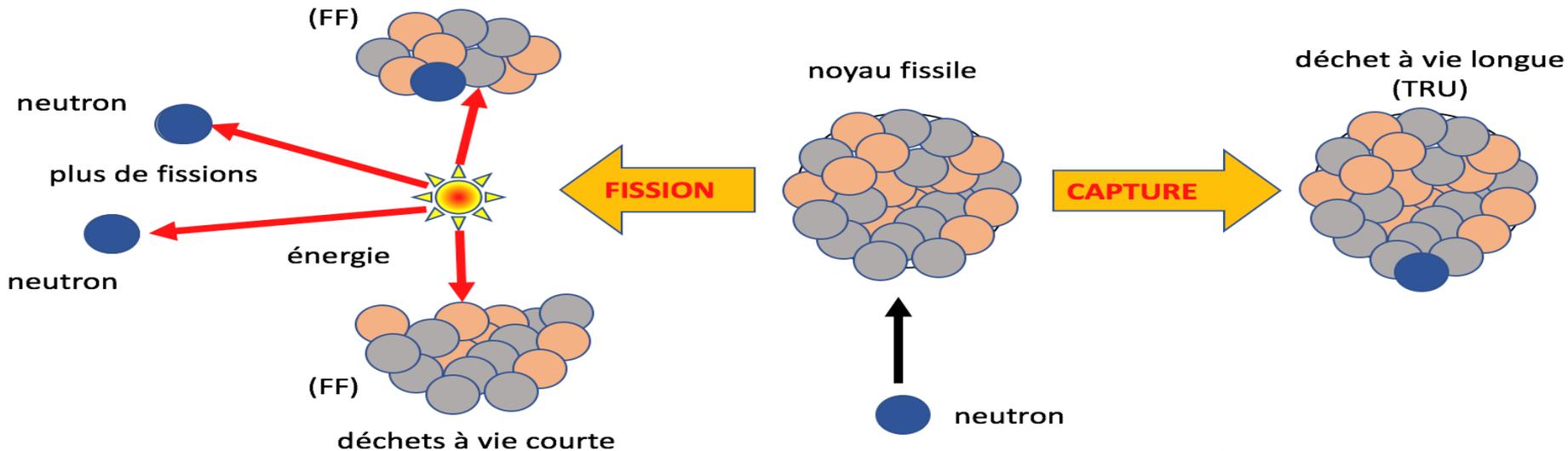


^{235}U

Source:Wikipedia



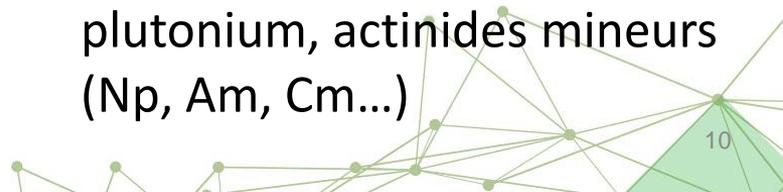
Les déchets du combustible uranium



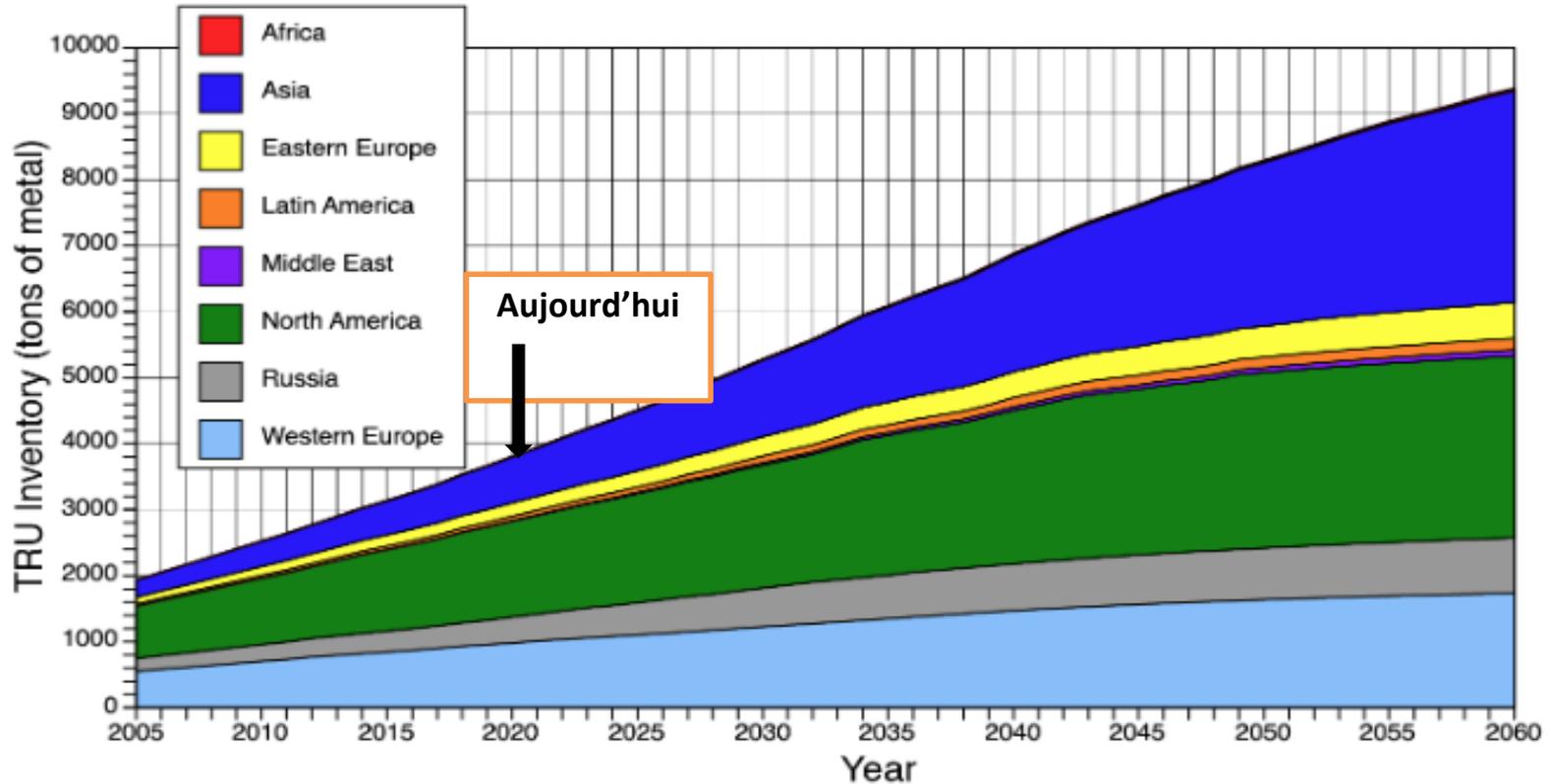
Déchets de haute radioactivité:

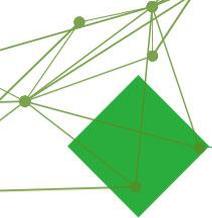
Fragments de fission

Elements transuraniens:
plutonium, actinides mineurs (Np, Am, Cm...)



Déchets radioactifs de très longue durée de vie produits dans le monde (en tonnes)

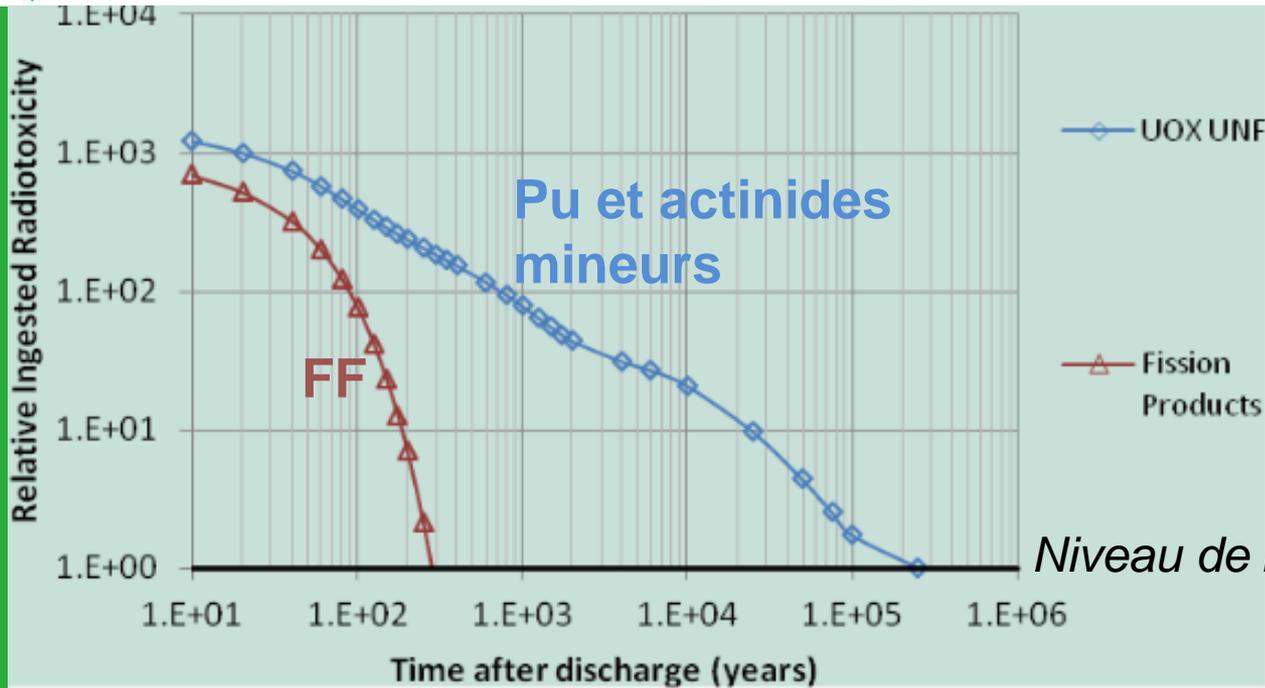




Les déchets nucléaires du combustible uranium

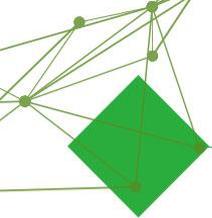
- ◆ Le **volume total de ces déchets est faible** (comparaison avec 100 millions de tonnes de déchets de centrales à charbon par année aux Etats-Unis).
- ◆ Le problème, c'est qu'une petite partie doit **être isolée de l'environnement pendant très longtemps**, car elle est très radioactive, c. à d. qu'elle émet des **particules ionisantes nocives pour les cellules vivantes**.

La vie longue des déchets de l'uranium usagé



Niveau de l'uranium naturel

Yasir Arafat et al.,
Westinghouse Electric Company



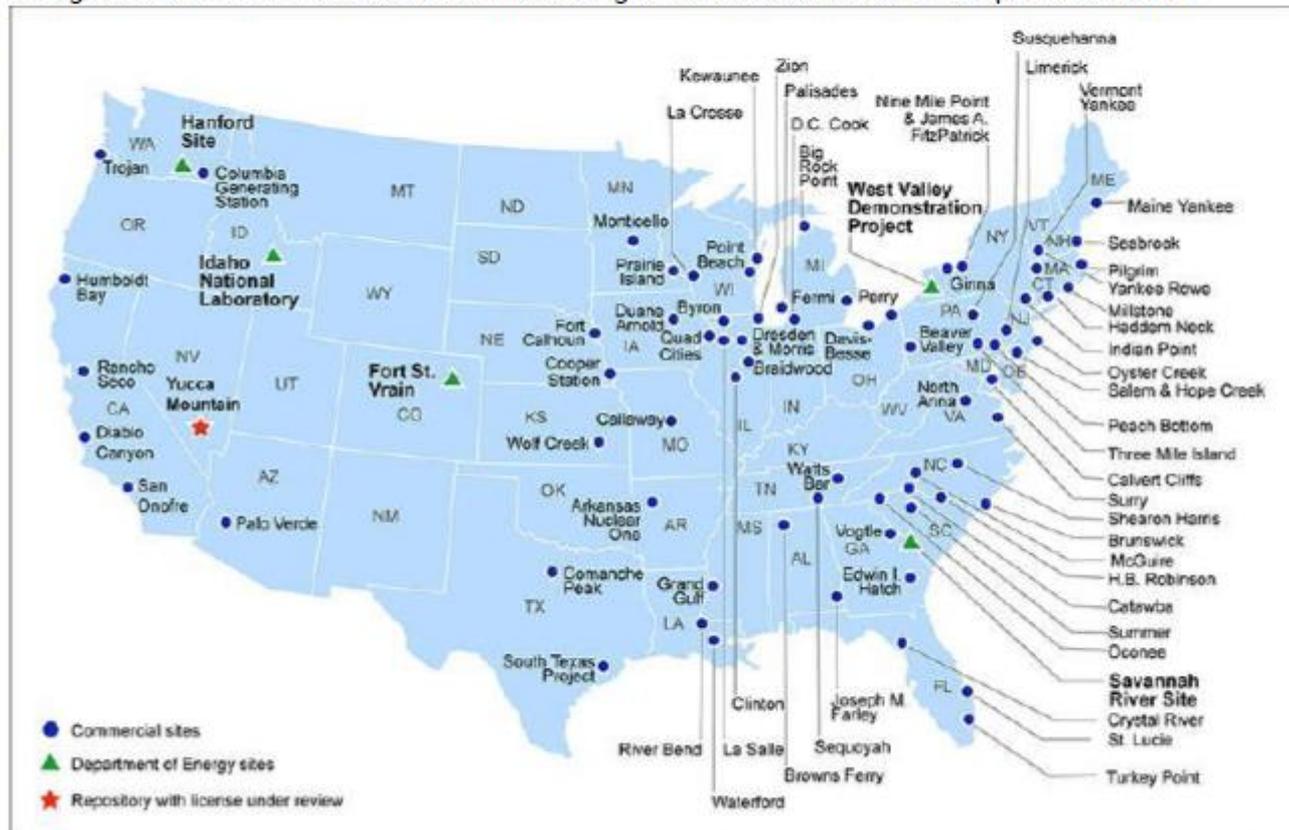
*Des centaines de milliers d'années semblent
inconcevables à gérer (Homo Sapiens)*



Grotte Chauvet

80 Temporary Storage Sites across 35 States

Storage Sites for Defense-Related and Commercial High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel



- Department of Energy 2009 estimate of temporary “on-site” storage of nuclear waste

\$300,000/Ton - 100 year period
GAO 2009 - [Link-p.71](#)

There are no “on-site” storage cost estimate for the lifetime of the waste, 300,000 years.

- Est. Cost of direct storage:
\$670,000 / Ton (CBO 2007 - [Link-p.7](#))

- Est. Cost of reprocessing:
\$700,000 - \$1,520K / Ton (ibid)

In 2018 \$ from 2007 by [Inflation Calculator](#)

BURE : STOP !

Déchets nucléaires

burestop.eu

Déc. 2015

Que faire si on n'enterre pas les déchets nucléaires ?

LOIS SUR CIGÉO

Ils veulent passer en force et faire accélérer le projet !

RISQUES

Réels, insensés

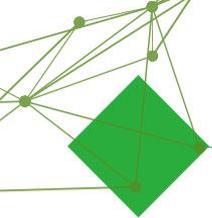
A suivre

ÇA DÉFORESTE

ÇA RÉTONNE

Sur le terrain, les travaux préparatoires se multiplient

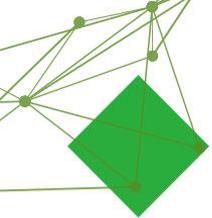
Pas de réponse politique à cette question !



Question scientifique

- ◆ Peut-on remplacer la production d'électricité d'origine fossile par une technologie nucléaire **sans déchets de longue durée de vie**, sûre et économique ?
- ◆ Complémentaire à l'hydraulique et au renouvelable variable?





Exploiter l'énergie nucléaire d'une façon différente est possible

Pour remplacer l'uranium, utiliser un combustible très répandu sur la planète, mais encore très peu utilisé, le **métal thorium**

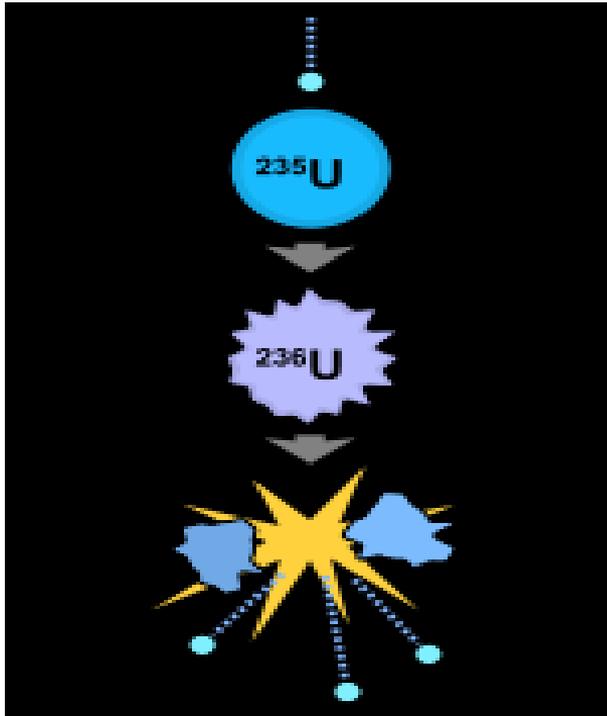
et

mettre en œuvre une application géniale de la physique des particules développée et validée au CERN, **ystème hybride ou « Accelerator Driven System» (ADS)**



Fission de l'uranium

fissile

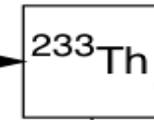


Régénération avec le thorium

Fertile

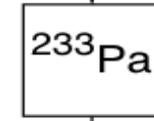
Pas fissile

Capture de neutron



Demi-vie
22.3 min

τ_2



Demi-vie
27 jours

τ_3

σ_f



fissile

La place du thorium dans le tableau des éléments

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
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
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
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
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	

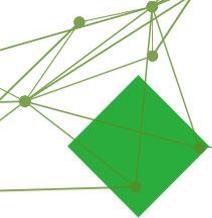
Lanthanides

Thorium-232

Plutonium-239

Uranium-238

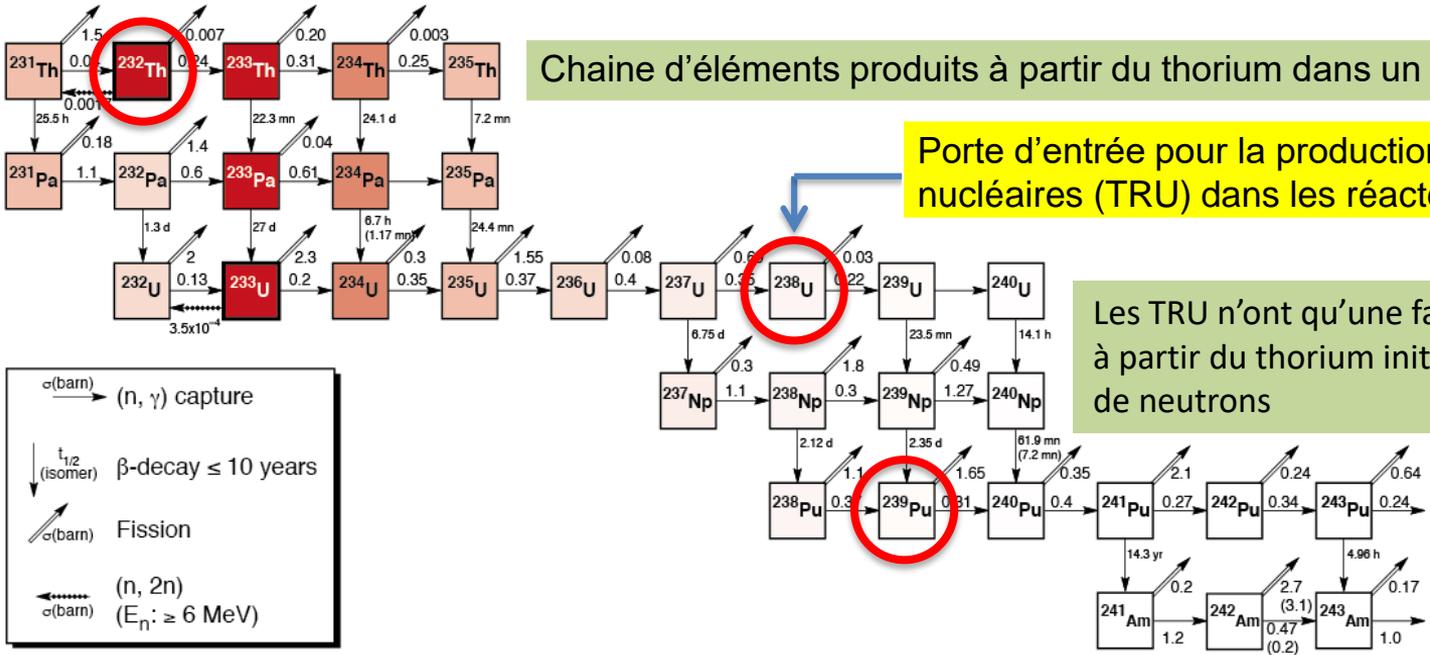
Un combustible qui minimise la production de déchets



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



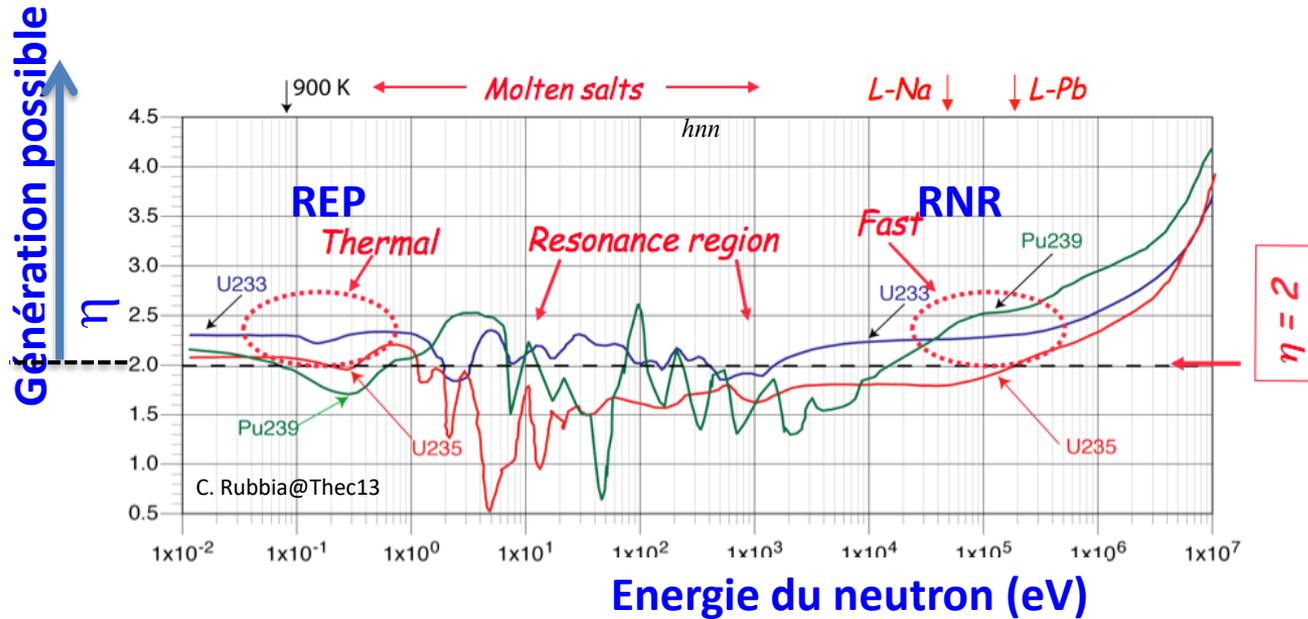
Transuraniens (TRU)



Pourquoi des neutrons rapides? (1)

Les neutrons de haute énergie (rapides) sont nécessaires à la régénération (breeding) du combustible

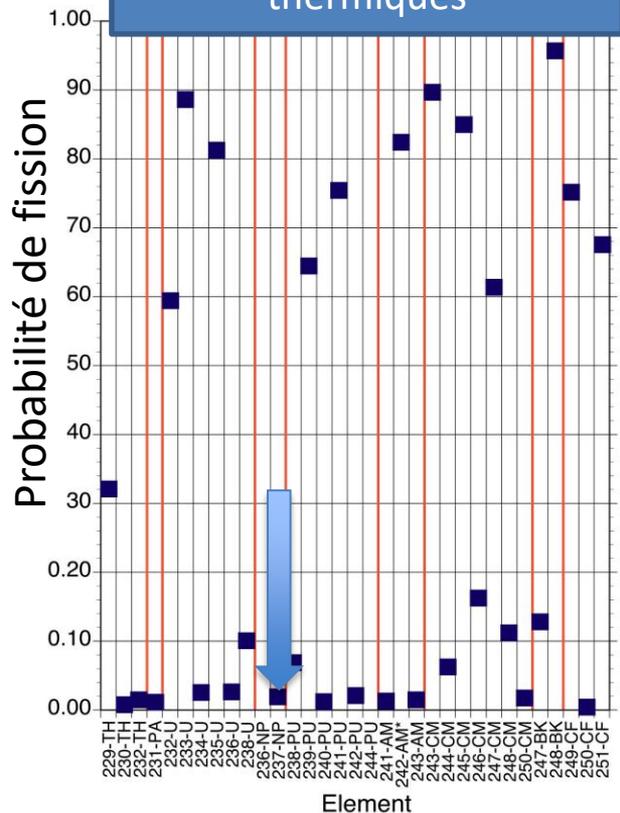
$$h^0 n \frac{S_f}{S_f + S_c} > 2$$



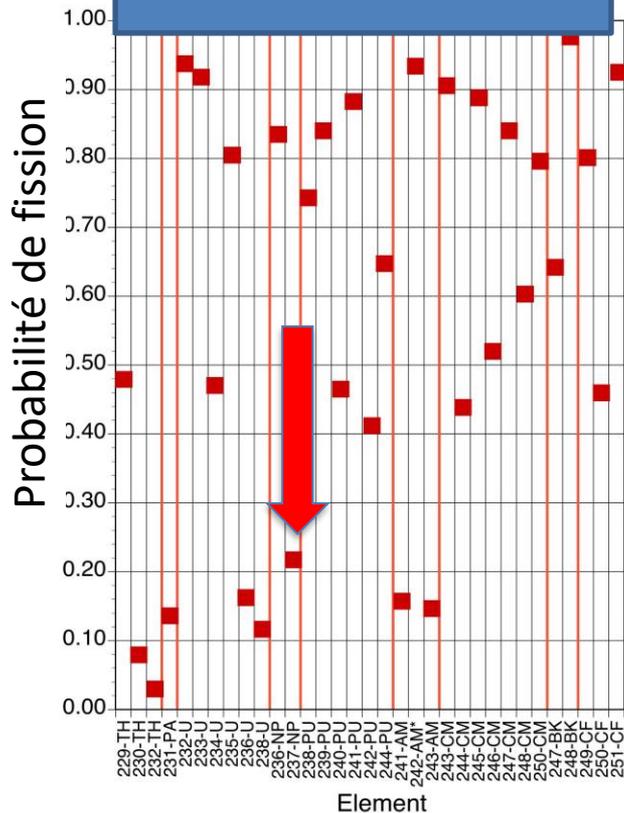
La régénération est possible lorsque η , le nombre de neutrons produits par neutron absorbé, est plus grand que 2. Les neutrons les plus favorables sont les neutrons de haute énergie (domaine des réacteurs à neutrons rapides – RNR)

Pourquoi des neutrons rapides? (2)

Flux de neutrons thermiques



Flux de neutrons rapides



Dans un flux de neutrons rapides, les éléments transuraniens peuvent fissionner, et ne s'accumulent pas autant que dans un flux de neutrons thermiques – ils peuvent donc être détruits par fission (et produire de l'énergie)



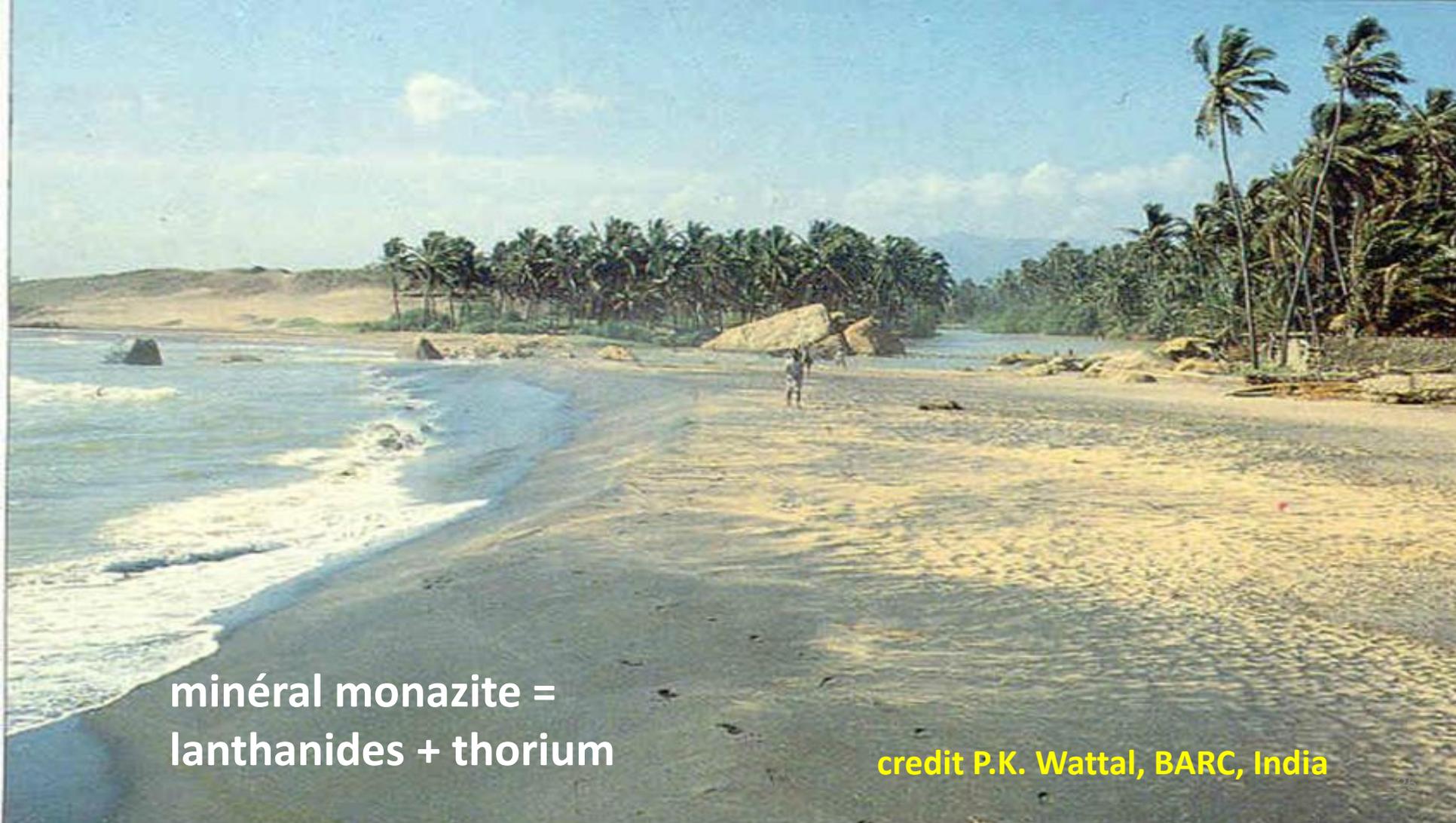
Pour produire en continu 1 GW d'électricité pendant
une année:

Une tonne de thorium

sans émission de CO_2

Ou 200 tonnes d'uranium naturel enrichi sans émission de CO_2

Ou 3,500,000 tonnes de charbon impact significatif sur l'environnement



**minéral monazite =
lanthanides + thorium**

credit P.K. Watal, BARC, India

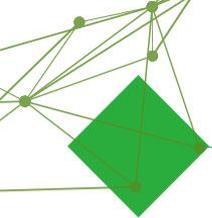
Le thorium constitue une source non encore exploitée, disponible mondialement.

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

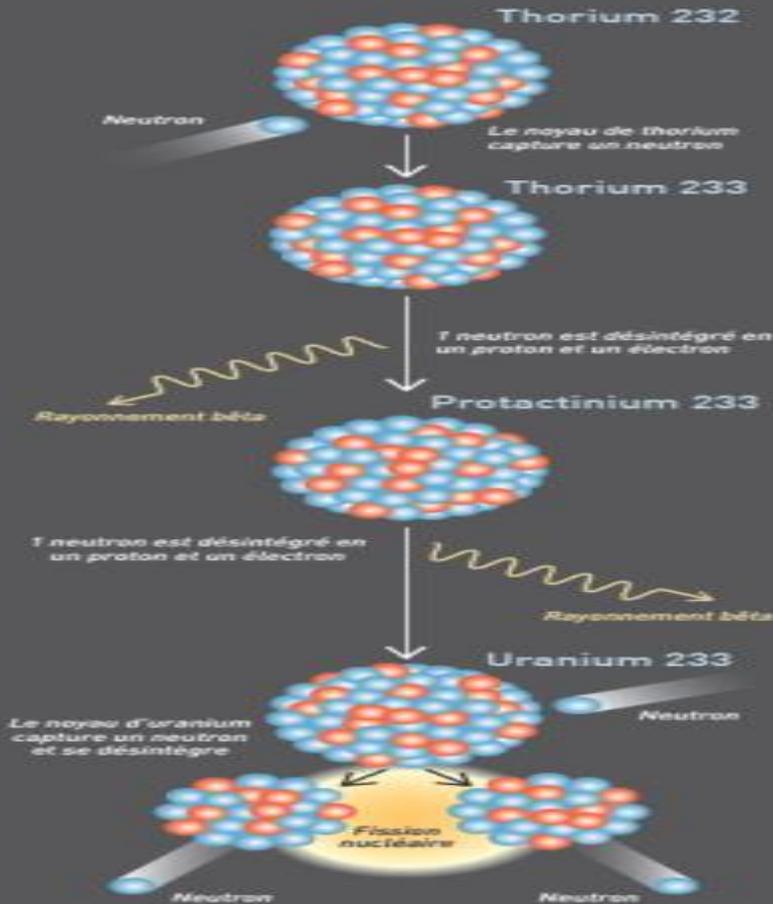


Utilisation démontrée, mais technologie abandonnée en 1972 , car les USA plus intéressés à produire des armes nucléaires que de l'énergie

- La production de plutonium militaire **nécessitait** des réacteurs à l'uranium
- Mais **aujourd'hui** le thorium représenterait un avantage si l'on veut limiter la prolifération des armes nucléaires.
- Et **aujourd'hui** une solution viable pour produire de l'énergie à partir d'une réaction nucléaire, grâce à
 - **De nouveaux matériaux**
 - **De nouveaux moyens de calcul par rapport aux années 1960-70!!!**

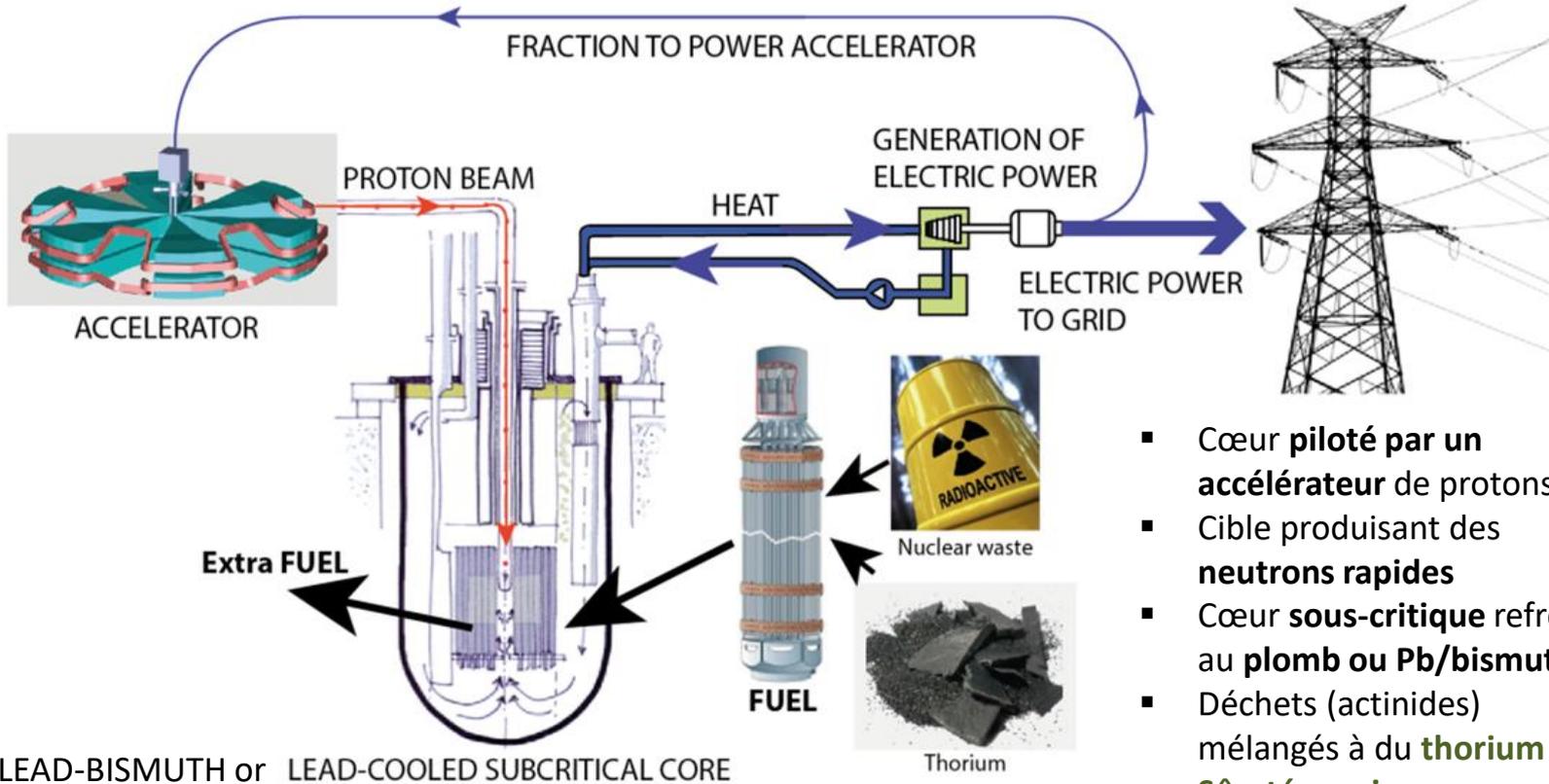
Energie de fission avec ^{232}Th

Production d'uranium à partir de thorium

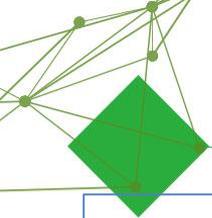


Comment produire les neutrons initiaux ?

Une solution ingénieuse: piloter le réacteur par un accélérateur de haute puissance

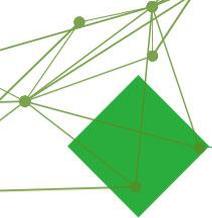


- Cœur **piloté par un accélérateur** de protons
- Cible produisant des **neutrons rapides**
- Cœur **sous-critique** refroidi au **plomb** ou **Pb/bismuth**
- Déchets (actinides) mélangés à du **thorium**
- **Sûreté passive**



Trois avantages des systèmes hybrides (ADS) au thorium

- 1. Sécurité:** systèmes sous-critiques, le cœur ne peut pas fondre comme à Fukushima
- 2. Gestion des déchets:** ne produisent pas de plutonium, ni d'actinide mineurs
- 3. Transmutation des combustibles usés:** éliminent par fission des déchets de vie longue des réacteurs conventionnels (ils acceptent des charges élevées d'actinides mineurs et de plutonium sans compromettre leur sécurité)



Et aussi

- i) 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) **Résistance à la prolifération:** fonctionner de manière continue pendant 5 à 10 ans, sans accès au combustible.

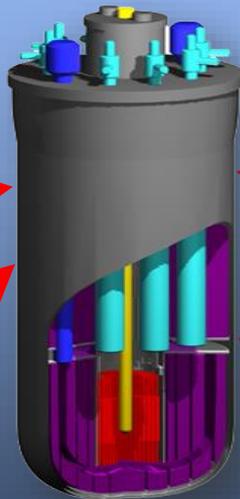
Les technologies de base de l'ADS existent



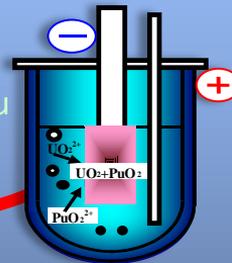
Accélérateurs haute puissance



Cibles de spallation à métaux liquides

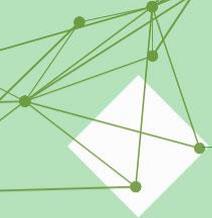


Retraitement pyroélectrique du combustible



Réacteur à neutrons rapides avec modérateur plomb-bismuth

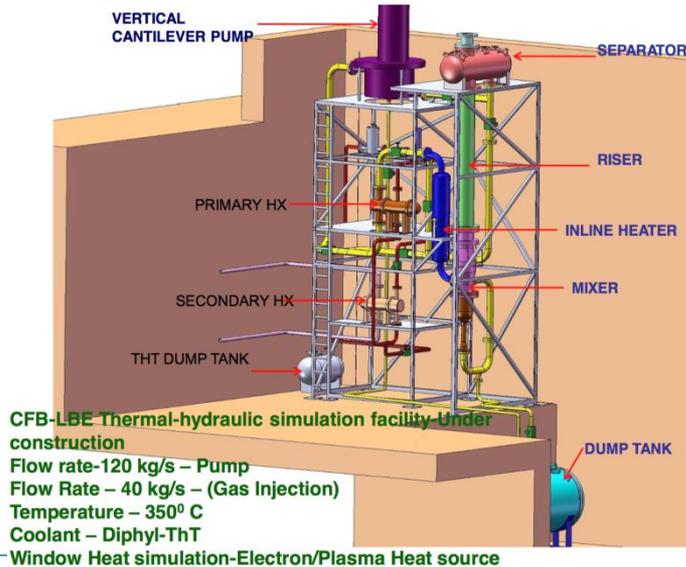




De la recherche et des développements sont encore nécessaires

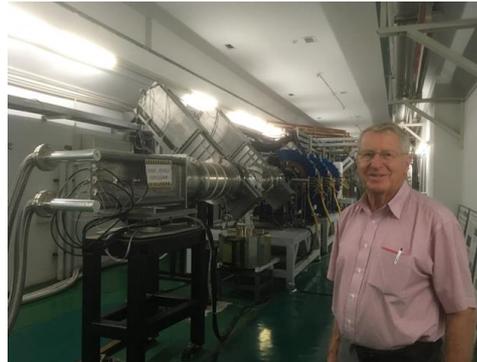
- ◆ Accélérateurs de hautes puissances
- ◆ Fenêtre de faisceau
- ◆ Réduction des interruptions de faisceaux
- ◆ Couplage accélérateur-réacteur
- ◆ Réacteurs sous-critiques
- ◆ Matériaux structurels
- ◆ Faisabilité et traitement de combustibles innovants
- ◆ Utilisation de métaux liquides (Pb, Pb-Bi)
- ◆ Données nucléaires et programmes de simulation

Des projets existent dans le monde



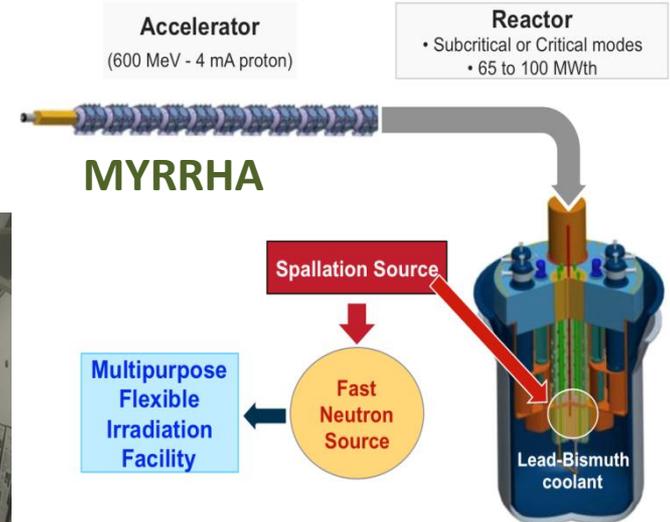
INDE

Développement d'un accélérateur de puissance (US projet X)
BRAHMMA système sous-critique
 Boucle Plomb/Bismuth
 Test de combustible Thorium



CHINE
CiADS

**La Belgique alloue
 558 M € pour 2019 - 2038**



Jeune startup



TRANSMUTEX
 Nuclear Waste to Green Energy

Stratégie de Transmutex: une expérience de démonstration

- ◆ Rapidité: utiliser un accélérateur ou un réacteur existant
- ◆ Economie: maximum de résultats avec un minimum d'investissements
- ◆ Approche semi-commerciale: développement industriel

- ◆ Objectifs:
 - Démontrer le fonctionnement et la sécurité intrinsèque d'un ADS à une puissance significative
 - Démontrer la performance:
 - Taux de transmutation d'actinides mineurs
 - Utilisation de combustibles aux thorium
 - Vérification des programmes de simulation

Infrastructure existante à l'INR de Moscou



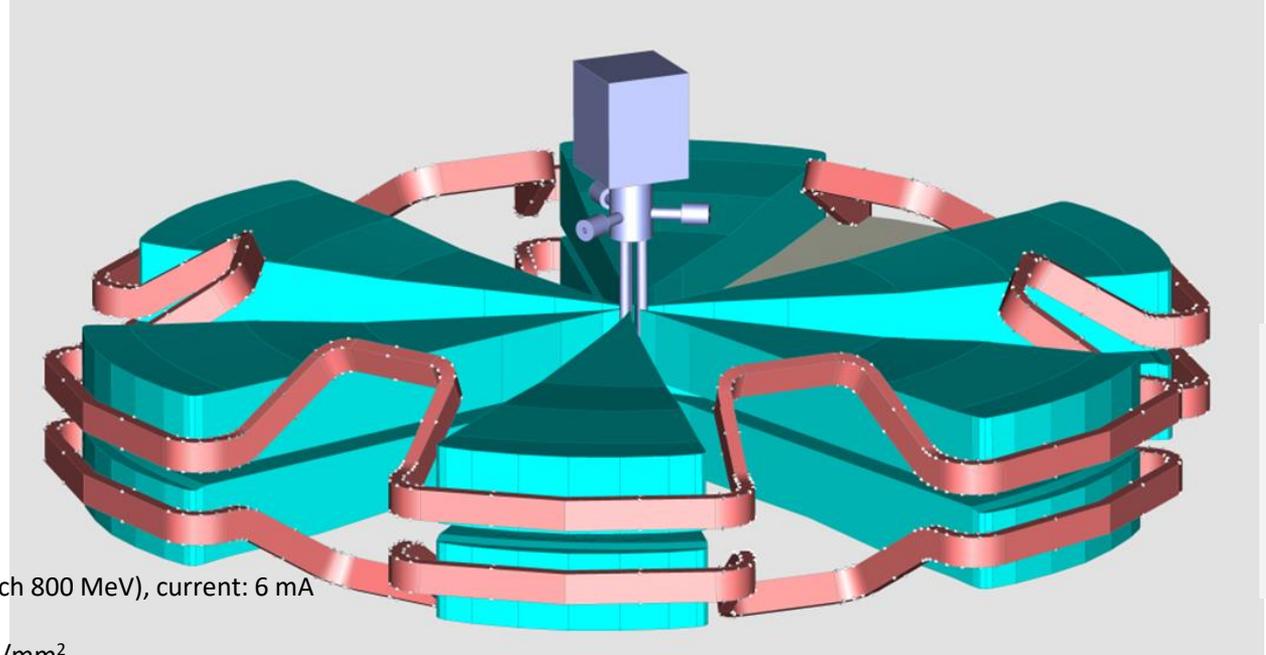
- Proton linear accelerator (≤ 600 MeV, ≤ 300 kW)
- Spallation neutron source
- Pit on a beam line to receive a **subcritical core**
- Infrastructure to manipulate highly radioactive material

En négociation avec ROSATOM

Développement d'un accélérateur (cyclotron) de forte intensité pour ADS

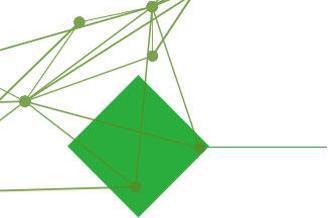
Partenariat avec AIMA Development, Nice, France

Concept innovant:
Compact, efficace,
fiable, faible coût



- Extracted beam energy: 600 MeV (could reach 800 MeV), current: 6 mA
- Based on the reverse valley field concept
- Superconducting coil current density: 43.5 A/mm²
- Extraction radius: 4.5 m**
- 3 injection lines





L'hydrogène vecteur de l'énergie

« Je crois qu'un jour l'eau servira de carburant, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constituent, utilisés seuls ou ensemble, fourniront une source inépuisable d'énergie et de lumière, d'une intensité dont le charbon n'est pas capable. Je crois aussi que lorsque les ressources en charbon seront épuisées, nous nous chaufferons grâce à l'eau. L'eau sera le charbon du futur. »

Jules Verne, 'L'île mystérieuse', 1870

Utiliser la haute température des réacteurs au plomb pour produire de l'hydrogène en décomposant directement l'eau au lieu de l'électrolyse.

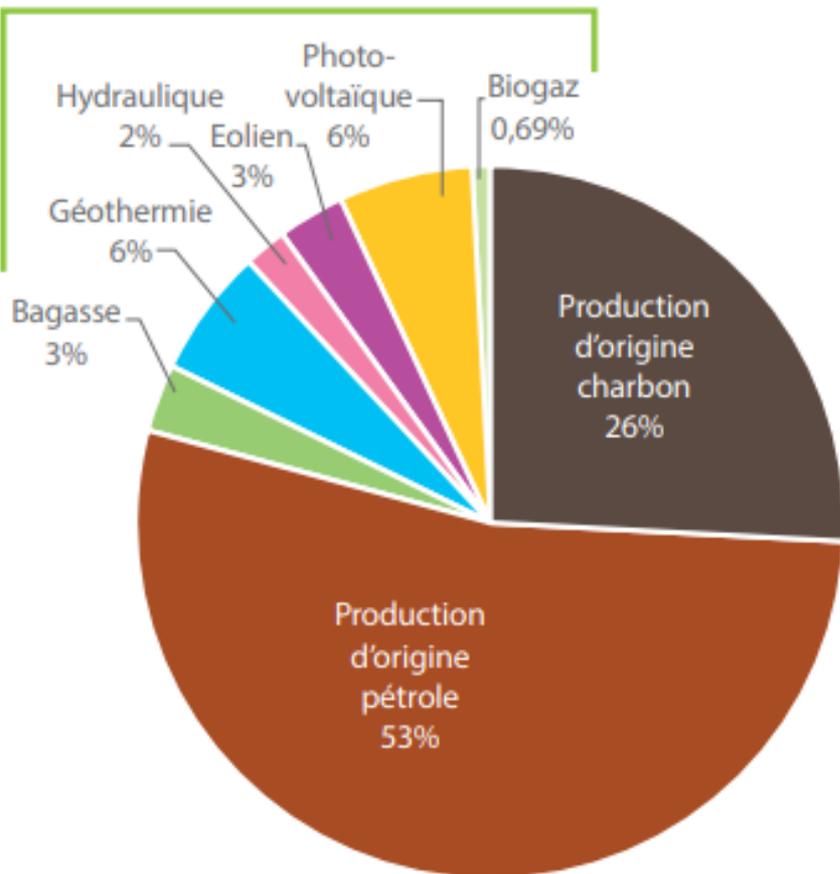
Merci



Maurice.Bourquin@unige.ch
<http://ithec.org/en/organisation/>

En Guadeloupe

Energies renouvelables



Répartition de la production d'énergie selon la source d'énergie primaire en 2018
(Source : OREC)