

Géopolitique du cycle du combustible

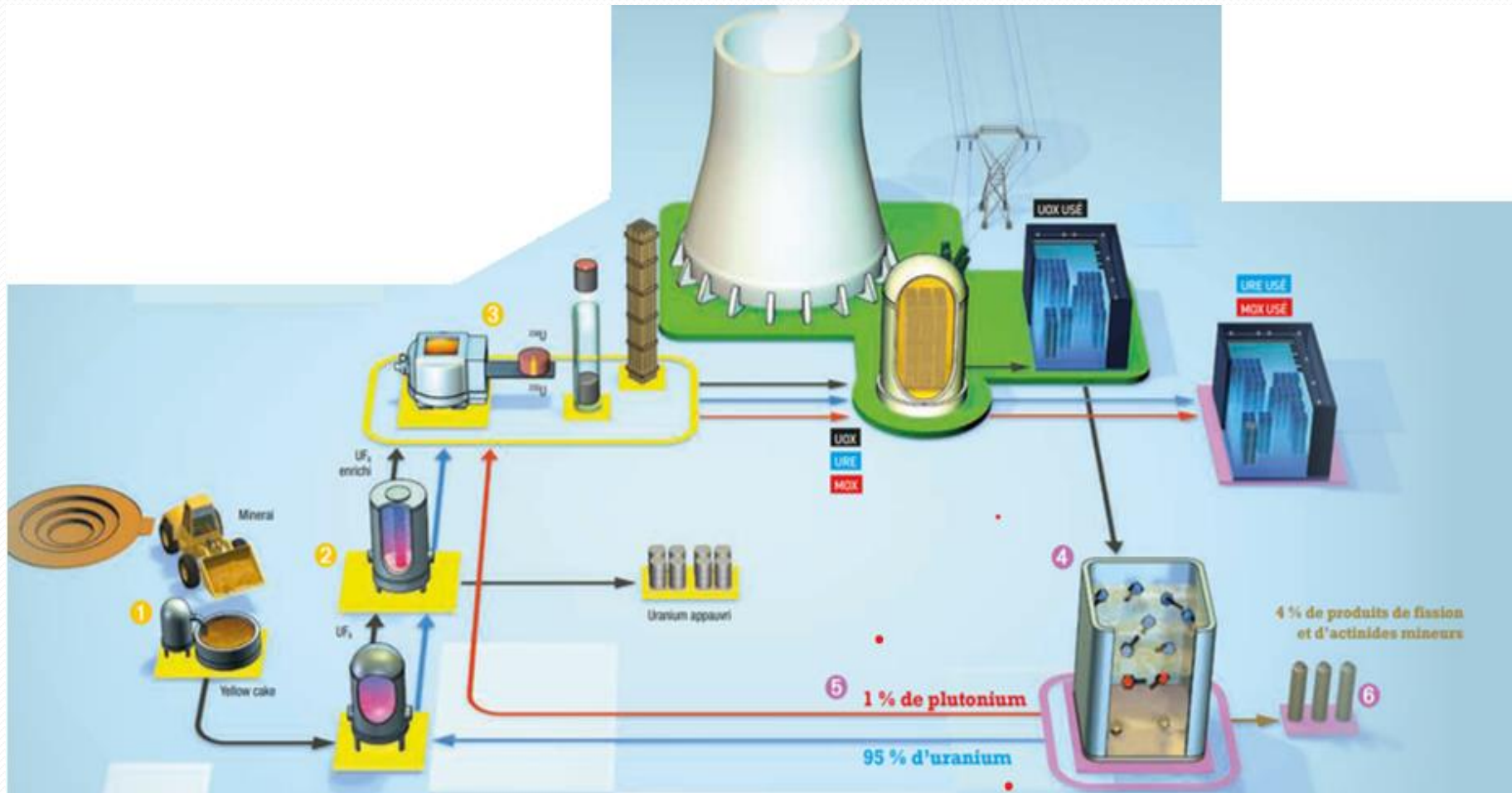
SFEN / PACA – 7 février 2024

Dominique GRENECHE

Plan

- **Le cycle du combustible**
 - Vue d'ensemble
 - L'uranium
 - L'enrichissement
 - La fabrication du combustible
 - L'aval du cycle
- **Aspects géopolitiques**
 - La fabrication du combustible : des enjeux industriels
 - L'enrichissement : le risque de prolifération nucléaire
 - L'uranium : le nerf de la guerre
- **CONCLUSION**

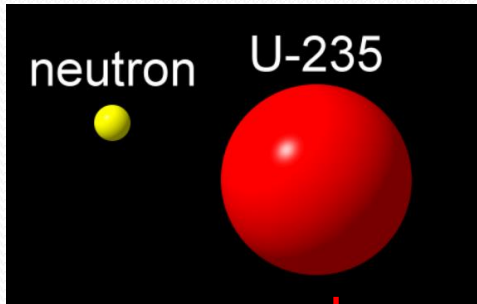
Le cycle du combustible en un coup d'oeil



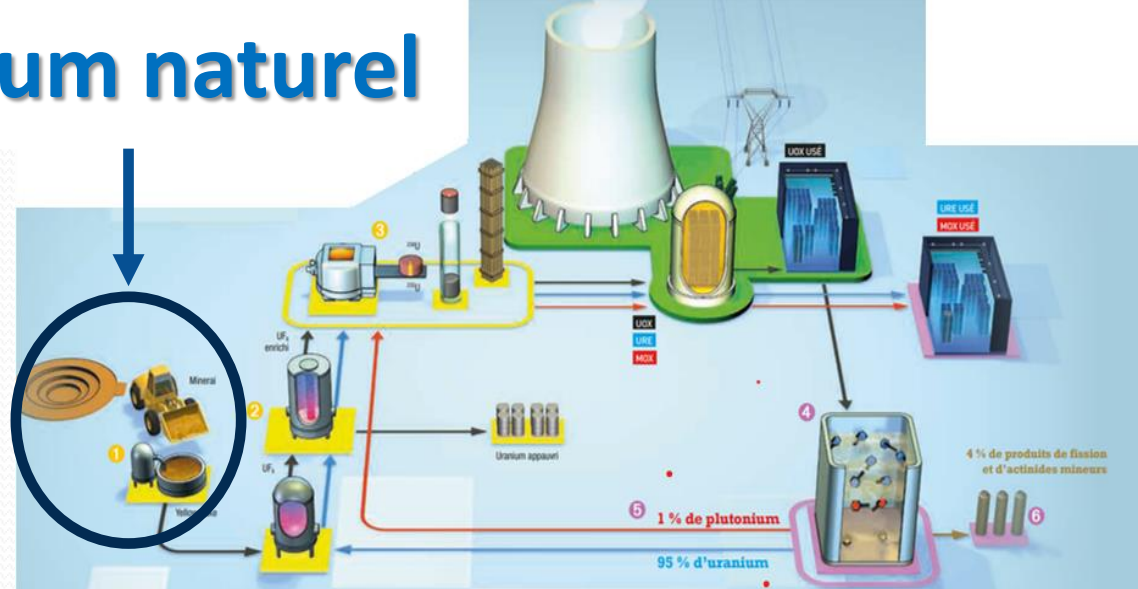
Production d'uranium naturel

1 – POURQUOI L'URANIUM ?

C'est le seul élément de la nature qui contient un isotope fissile



== > Fission = énergie



1 H																	2 He															
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne											
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar											
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															
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															
55 Cs	56 Ba		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															
87 Fr	88 Ra		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															
																		87 La	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
																		89 Ac	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



0,7 % de matière grasse (U235)



L'uranium naturel sur la planète



Concentration moyenne croûte terrestre : 2,8 ppm



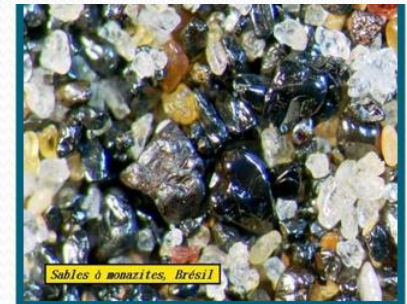
Sklodowskite : $(\text{H}_3\text{O})_2 \text{Mg} (\text{UO}_2)_2 (\text{SiO}_4)_2, 4\text{H}_2\text{O}$



Autunite: $\text{Ca} (\text{UO}_2)_2 (\text{PO}_4)_2, 10\text{H}_2\text{O}$



Cupro-Sklodowskite : $(\text{H}_3\text{O})_2 \text{Cu} (\text{UO}_2)_2 (\text{SiO}_4)_2, 4\text{H}_2\text{O}$



Sand with monazite : $(\text{REE}, \pm \text{Th U}) \text{PO}_4$

Il y en a aussi dans l'eau de mer : 3 ppb = 4 milliards de tonnes

1 - PROSPECTION



Au sol (gamma métrie)



Forages :ici
désert de
GOBI en
Mongolie
(Orano)

Echantillonnage



Mine à ciel ouvert
au Niger (Orano)



300 tonnes de minerai



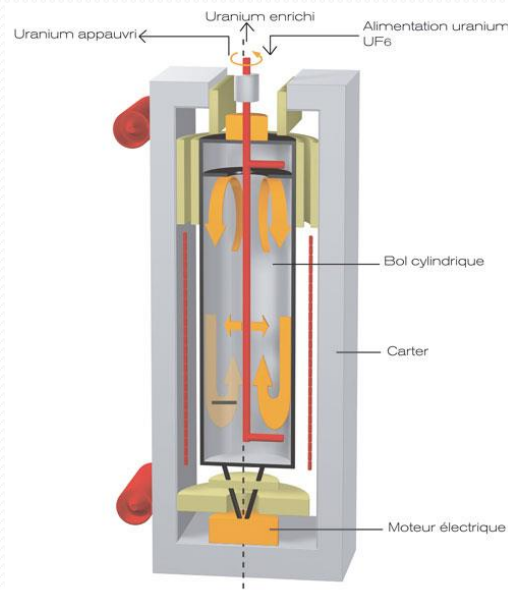
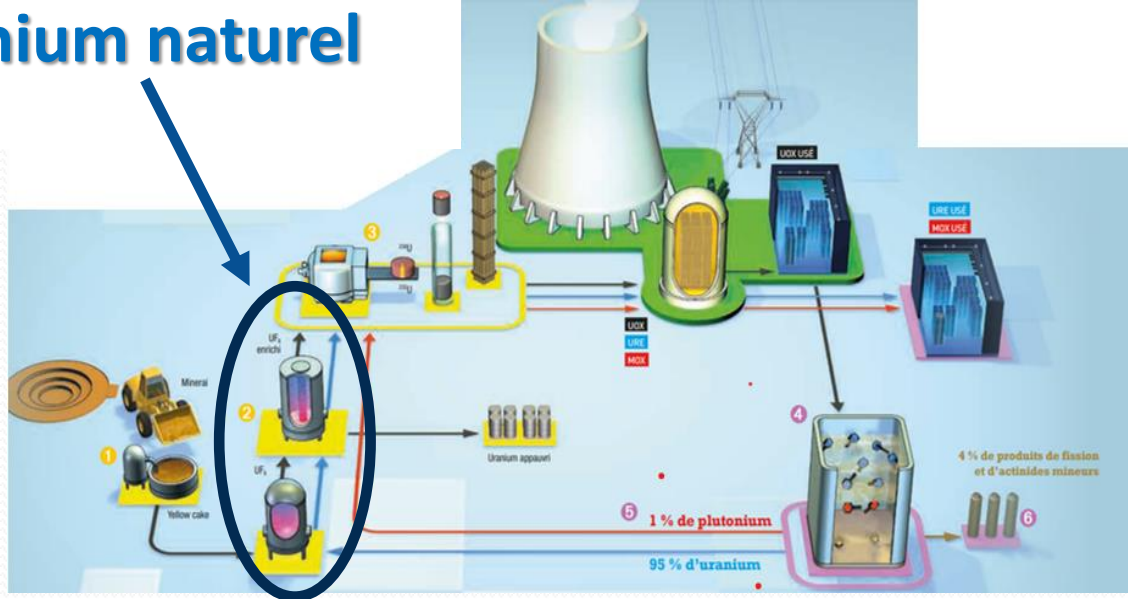
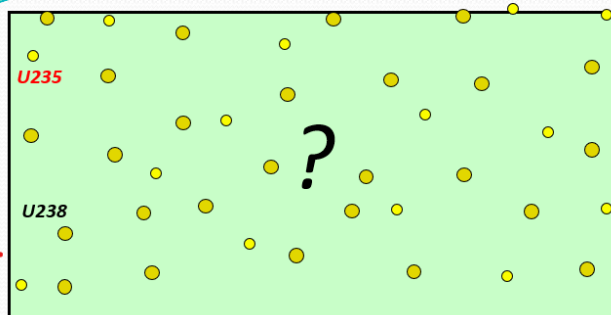
A la sortie de la mine :

Le YELLOW CAKE



France importe : 10 000 tonnes par an : cela tient dans un CARGO

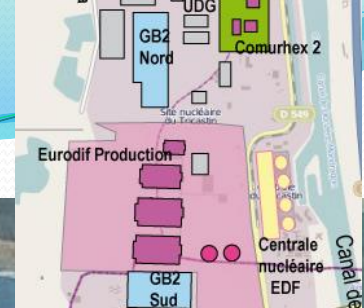
Enrichissement de l'uranium naturel



50 à 70 000 t/min (secret !) – Paliers magnétiques

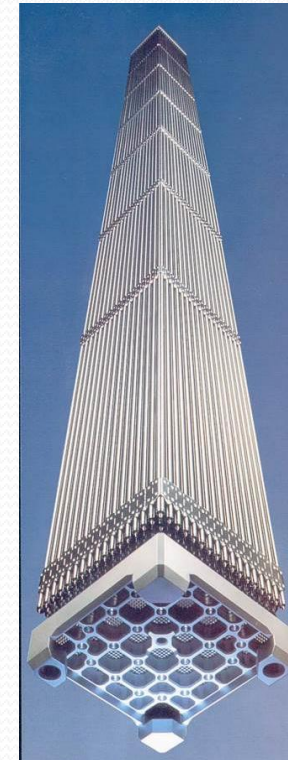
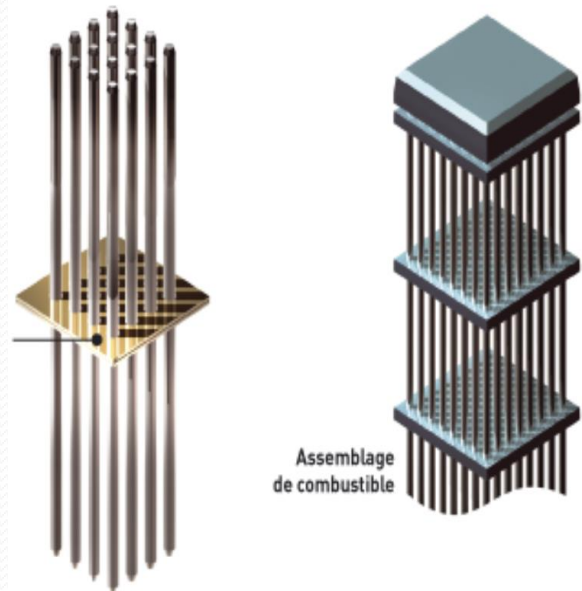
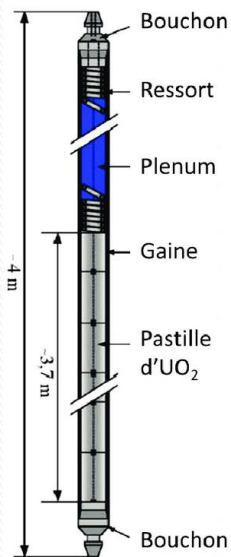
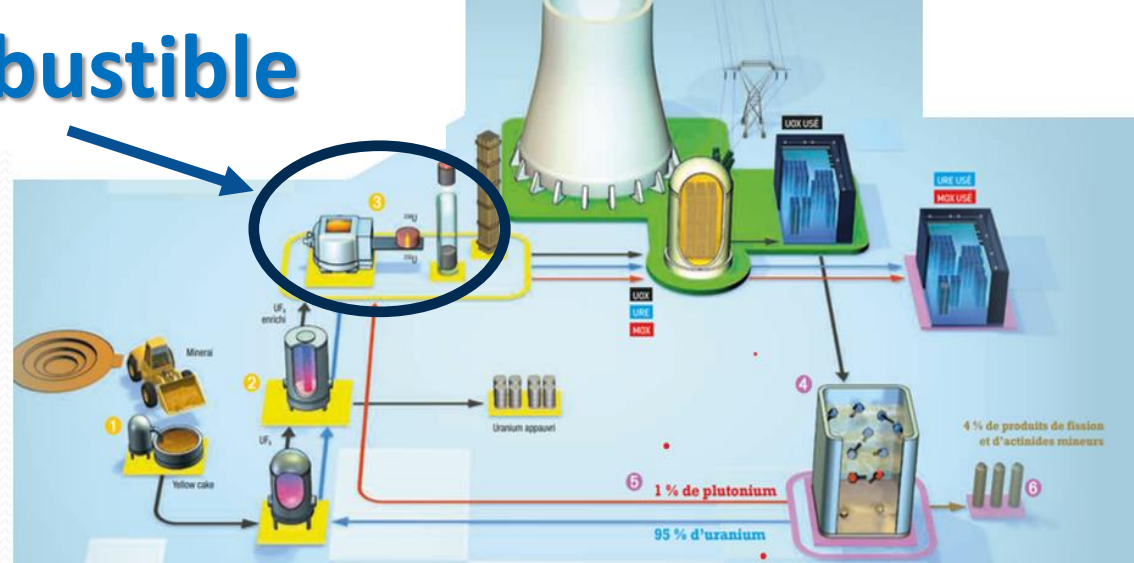
Procédé (universellement adopté aujourd'hui : **la centrifugation**)

Les usines d'enrichissement GB1 et GB2



Fabrication du combustible

C'est un fagot de tubes contenant des pastilles d'UO₂



Fabrication du combustible

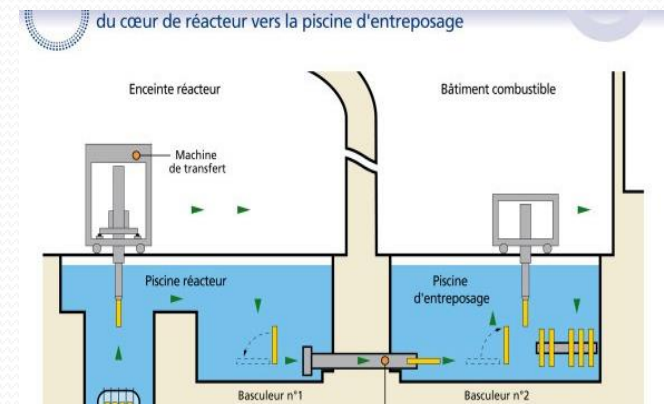
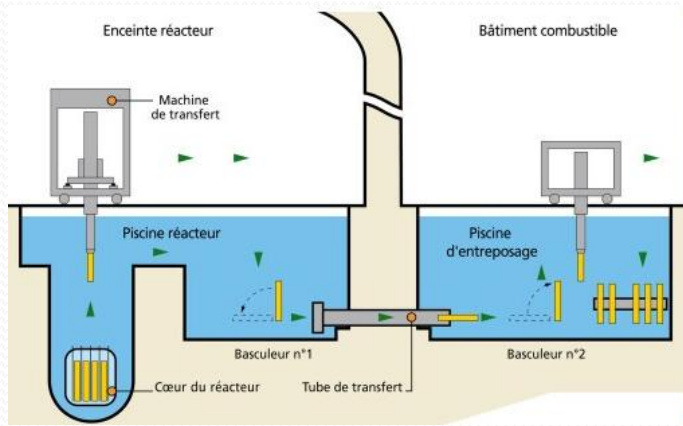
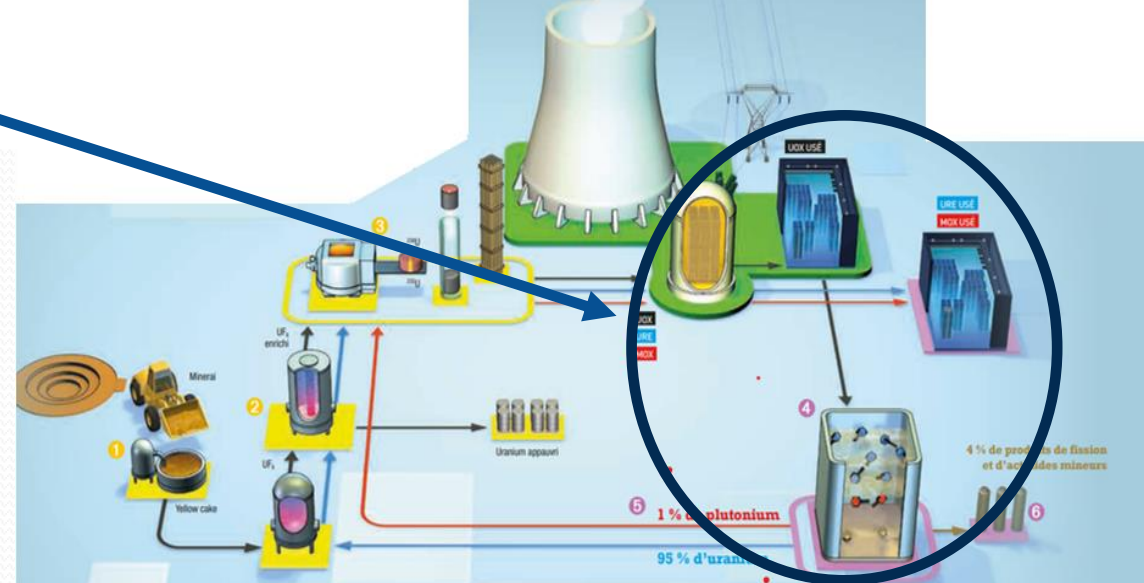
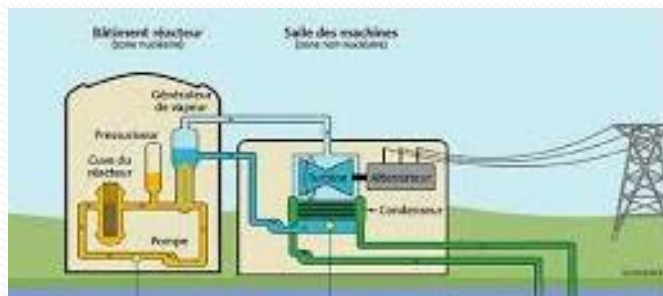


**Combustible
NEUF**

**Chargement
du combustible
en réacteur**
(cuve ouverte sous eau)



Combustible utilisé



Expédition du combustible utilisé vers l'usine de retraitement

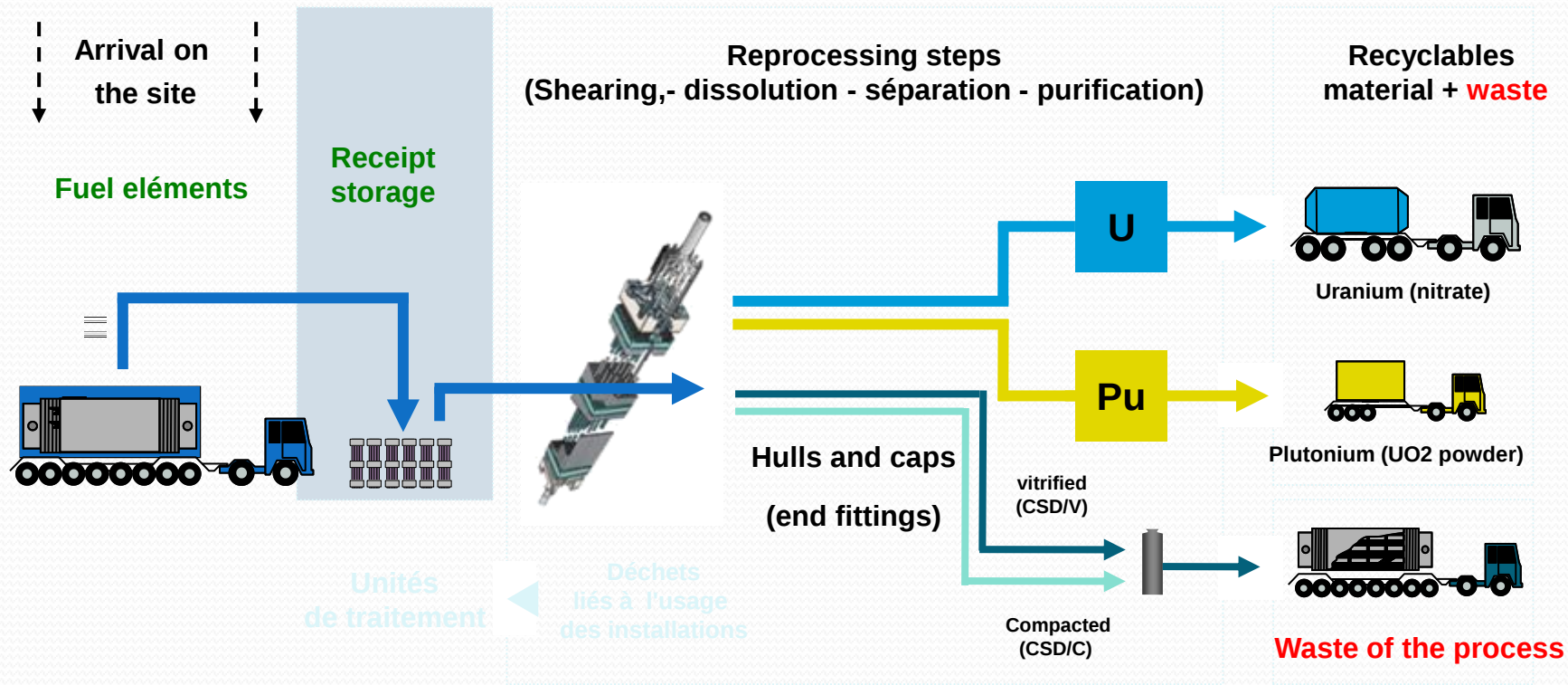
Par route ou rail



The AREVA A HAGUE plant



Principales étapes du traitement des combustible usés



Combustible utilisé : 95 % U 1 % Pu 4 % pf (+ 015 % AM)

Plan

- Le cycle du combustible
 - Vue d'ensemble
 - L'uranium
 - L'enrichissement
 - La fabrication du combustible
 - L'aval du cycle
- **Aspects géopolitiques**
 - **La fabrication du combustible : des enjeux industriels**
 - L'enrichissement : le risque de prolifération nucléaire
 - L'uranium : le nerf de la guerre
- CONCLUSION

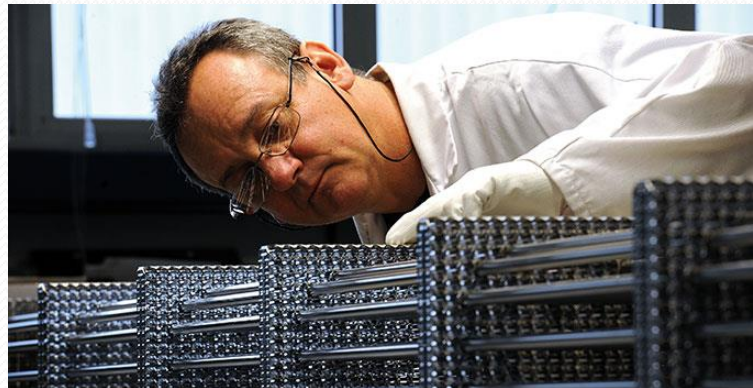
Les enjeux géopolitiques sont (presque) inexistants

La seule exception est celle des combustibles pour les réacteurs VVER russes (hors Russie) :

Arménie; Bangladesh; Bulgarie; Chine; Finlande; Hongrie; Inde; Iran; République Tchèque; Slovaquie; Turquie;
UKRAINE;

Westinghouse et **Framatome** sont sur les rangs pour se substituer aux fournisseurs russes (« opération spéciale »!)

REP (France, ...)



VVER



Des usines dans tous les grands pays

Brésil	INB	Envoyer
	FCJN Jianzhong	Yibin
Chine	CBNF	Baotou
	CNNFC	Baotou
France	Framatome-FBFC	Romains
	Orano	Malvési
Allemagne	Framatome-ANF	Lingen
Inde	Complexe de combustible nucléaire DAE	Hyderâbâd
	NFI (REP)	Kumatori
	NFI (BWR)	Tokai-Mura
Japon	Combustible nucléaire Mitsubishi	Tokai-Mura
	Combustible nucléaire mondial – Japon	Kurihama
Kazakhstan	Oulba	Oust Kamenogorsk
Corée	KNFC	Daejeon
Russie	TVEL-MSZ*	Électrostal
	TVEL-NCCP	Novossibirsk
Espagne	ENUSA	Juzbado
Suède	Westinghouse AB	Västeras
ROYAUME-UNI	Westinghouse**	Springfields
	Framatome Inc	Richland
Etats-Unis	Combustible nucléaire mondial – Amériques	Wilmington
	Westinghouse	Colombie

Plan

- **Le cycle du combustible**
 - Vue d'ensemble
 - L'uranium
 - L'enrichissement
 - La fabrication du combustible
 - L'aval du cycle
- **Aspects géopolitiques**
 - La fabrication du combustible : des enjeux industriels
 - **L'enrichissement : le risque de prolifération nucléaire**
 - L'uranium : le nerf de la guerre
- **CONCLUSION**

les procédés d'enrichissement de l'uranium

Il existe de nombreux procédés physico-chimiques qui permettent d'obtenir une séparation ou un enrichissement des isotopes d'un même élément »

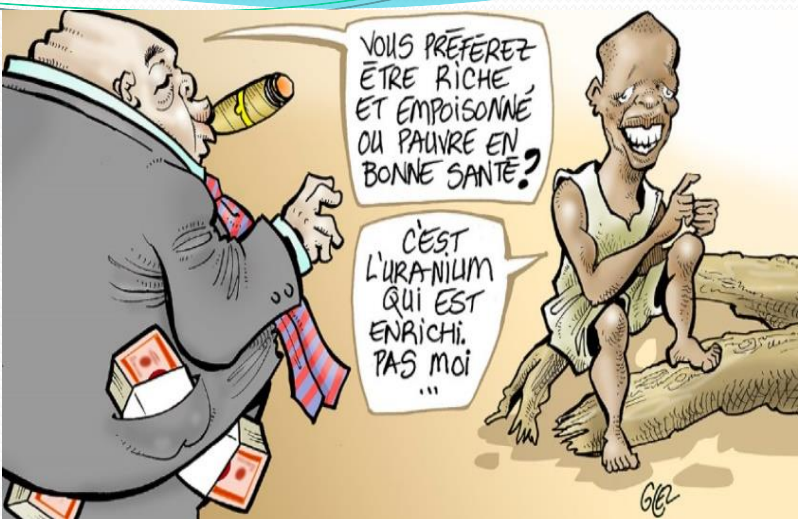
- **QUATRE procédés** qui ont été mis en œuvre pour l'uranium dans le cadre du projet Manhattan, à savoir, **la diffusion gazeuse (DG), séparation électromagnétique (EM), la diffusion thermique (DT), la centrifugation (CENT).**
- TROIS autres catégories :
 - La **séparation isotopique chimique** = ségrégation de deux formes chimiques d'un même élément dans des flux séparés, mais en contact. **France : CHEMEX « non proliférant »** (longs délais de mise en œuvre, criticité, réarrangement des cascades nécessaire pour obtenir de l'UHE, ...) : annonce à l'AIEA le 4 mai 1977*
 - Les procédés **aérodynamiques** = force centrifuge dans un gaz (UF_6) injecté à très grande vitesse dans une tuyère (Allemagne puis Afrique de Sud ➔ bombe atomique)
 - La séparation isotopique par laser = ionisation sélective d'une vapeur d'uranium au moyen de lasers de différentes longueurs d'ondes – Variantes : SILMO, SILVA, SILEX, ...

* « Le Monde » 5 mai 1977 : « L'accès à l'énergie nucléaire sans prolifération des armements »

Capacités mondiales d'enrichissement de l'uranium

(en milliers d'UTS, MUTS)

			%
France	Areva, Georges Besse I et II	7500	12,5
Allemagne-Pays-Bas-Royaume-Uni	Urenco : Gronau, Allemagne ; Almelo, Pays-Bas ; Capenhurst, Royaume-Uni.	13 700	22,8
Etats-Unis	Urenco, Nouveau-Mexique	4900	8,1
Russie	Tenex : Angarsk, Novouralsk, Zelenogorsk, Seversk	27 700	46,0
Chine	CNNC, Hanzhun et Lanzhou	6300	10,5
Autre	Divers : Argentine, Brésil, Inde, Pakistan, Iran	66	0,1
Total UTS/an environ		60 166	



- | | |
|--|-------|
| ➤ La France (Orano) : bientôt 18,6 % : 11 MUTS - | 16 % |
| ➤ L'Europe (Orano + Urenco total) : 31 % - | 24 % |
| ➤ La Russie leader incontesté (47 % des capacités mondiales) – | 6,8 % |
| ➤ USA (Urenco) : 8,1 % - Nouvelles capacités en projet | 23 % |

PAS DE TENSIONS GEOPOLITIQUES MAJEURES pour le nucléaire civil MAIS

Georges Besse fut assassiné en bas de son domicile à Paris, par 2 militantes d'Action Directe, le 17 novembre 1986. Joëlle Aubron et Nathalie Ménigon, ont été condamnées à perpétuité, mais libérées en 2004 et 2008 (NM en retraite)

Problème : les technologies d'enrichissement peuvent servir à produire de l'électricité ou des bombes atomiques !



Quelques insoumis s'enrichissent

- **Problème Iranien** : article 4 du TNP « droit **inaliénable**...de développer la recherche, la **production** et utilisation de **l'énergie nucléaire** à des fins pacifiques ».
- **Problème Coréen** : usines secrète (Kangson).
- **+ Pakistan** (le pays de **AQ Khan**) : Site de Chashma (diverses installations).
- **+ Inde** : usine « pilote » au Bhabha Atomic Research Center (BARC). Il existe une autre installation (centrifugation) : “Rare Materials Project”, en fonctionnement depuis 1990 à Rattehalli (Sud du pays)

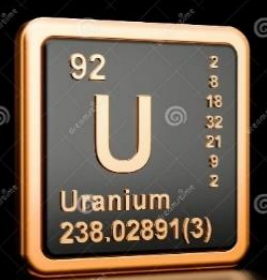


L'AIEA veille et les USA imposent leur loi dans quelques pays : « Accords 123 » = loi américaine (Bush 2006) : un pays qui s'engage dans une **coopération avec les Etats-Unis** dans le domaine nucléaire doit satisfaire au préalable à neuf critères de **non-prolifération** (conformité évaluée par le congrès Américain)

Enrichissement est une technologie SENSIBLE couverte par le SECRET

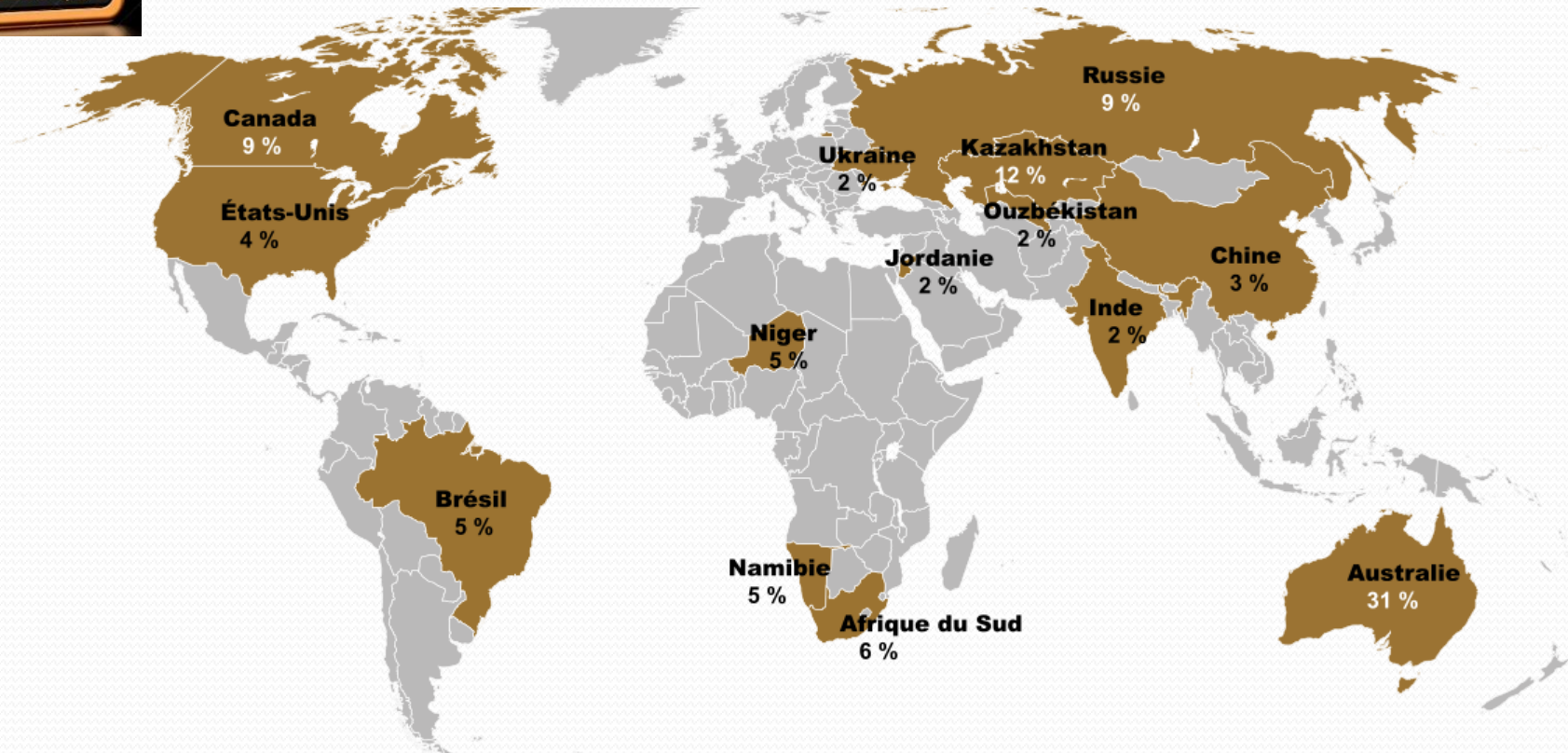
Plan

- **Le cycle du combustible**
 - Vue d'ensemble
 - L'uranium
 - L'enrichissement
 - La fabrication du combustible
 - L'aval du cycle
- **Aspects géopolitiques**
 - La fabrication du combustible : des enjeux industriels
 - L'enrichissement : le risque de prolifération nucléaire
 - **L'uranium : le nerf de la guerre**
- **CONCLUSION**



Répartition des ressources identifiées dans le monde

(<USD 130/kgU : 15 countries with more than 1% Share in the global resources)



Les ressources en uranium sont réparties sur 5 continents :
Amérique, Afrique, Europe, Asie Océanie

Mais ... la géographie de la production d'uranium ne recoupe pas celle de sa consommation

(comme hydrocarbures sauf USA et Russie ...)

En 2022, sur les 33 pays « nucléaires » 8 produisent de l'uranium.

Une curiosité (unique au monde) : OKLO au Gabon

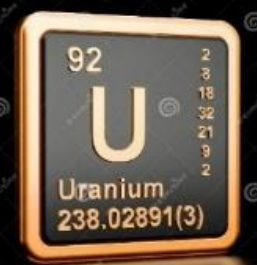


- Réacteurs (16) fossiles découverts par la France en 1972
- 1,95 milliards d'années
- Durée réactions en chaîne: plusieurs centaines de milliers d'années



« Aurait appartenu à
un ancêtre de Omar
Bongo » ???



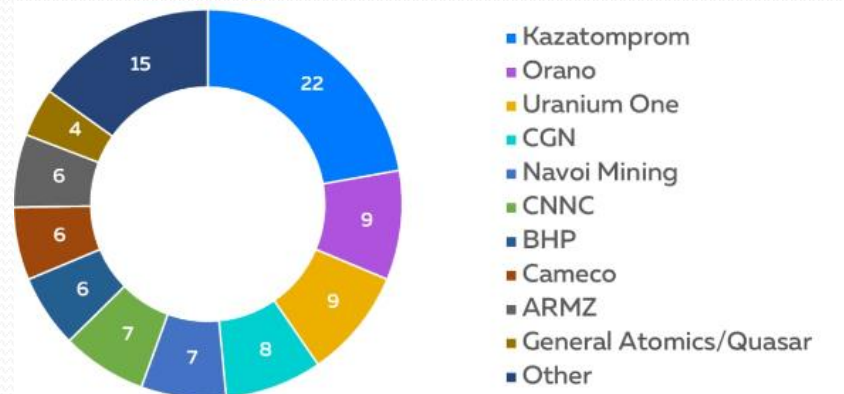


Les plus grands (production 2022)

Le « Top ten » des productions minières

Le mien	Pays	Propriétaire principal	Taper	Production (tonnes U)	% du monde
Lac aux cigares	Canada	Caméco/Orano	souterrain	6928	14
Husab	Namibie	Swakop Uranium (CGN)	mine à ciel ouvert	3358	7
Inkai, sites 1-3	Kazakhstan	Kazatomprom/Cameco	ISL	3201	7
Barrage olympique	Australie	BHP Billiton	sous-produit/souterrain	2813	6
Karatau (Budenovskoye 2)	Kazakhstan	Uranium One/Kazatomprom	ISL	2560	5
Rossing	Namibie	CNNC	mine à ciel ouvert	2255	5
SOMAIR	Niger	Orano	mine à ciel ouvert	2020	4
Quatre milles	Australie	Quasar	ISL	1740	3
Mynkuduk centrale	Kazakhstan	Ortalyk	ISL	1650	3
Inkai Sud 4	Kazakhstan	Uranium One/Kazatomprom	ISL	1600	3
Top 10 au total				28 125	57%

Le « Top ten » des opérateurs miniers (%)



Le « Top ten » des pays producteurs

	World	59,370
1	Kazakhstan	22,451
2	Canada	9,331
3	Australia	6,350
4	Niger	4,518
5	Namibia	4,323
6	Russia	3,153
7	Uzbekistan	2,400
8	United States	1,792
9	China	1,500
10	Malawi	1,132
11	Ukraine	922

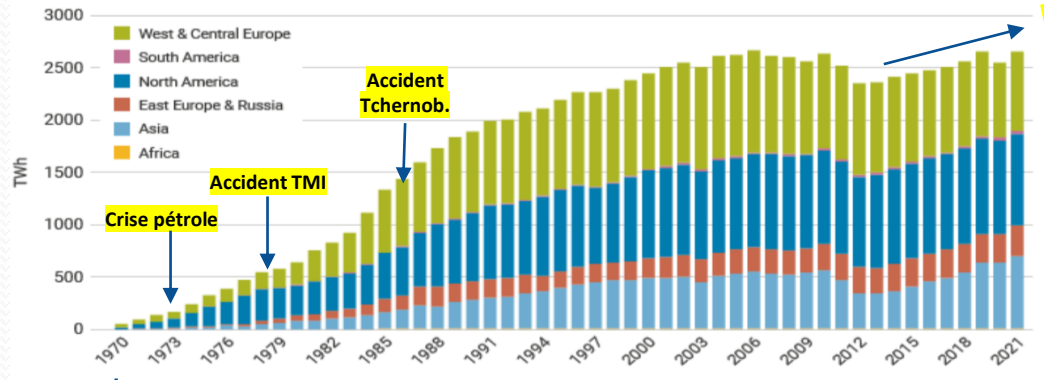
Production
2021
en tonnes

Production d'uranium à travers les âges

Elle a été influencée par de nombreux facteurs géopolitiques, dont :
la guerre froide, la crise pétrolière, la dissolution de l'URSS, ou événements divers (accidents)

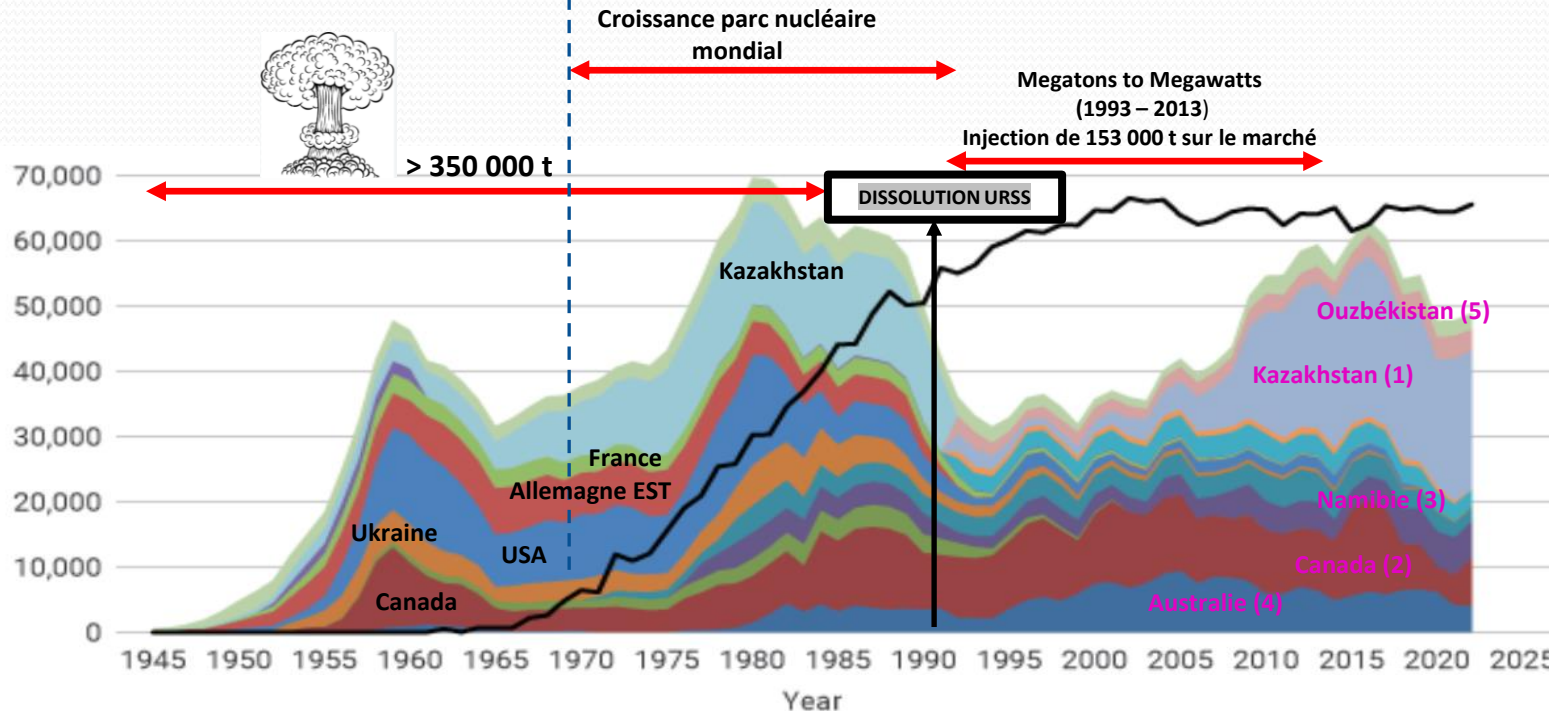


**Production
électrique
nucléaire**



Nombre réacteurs

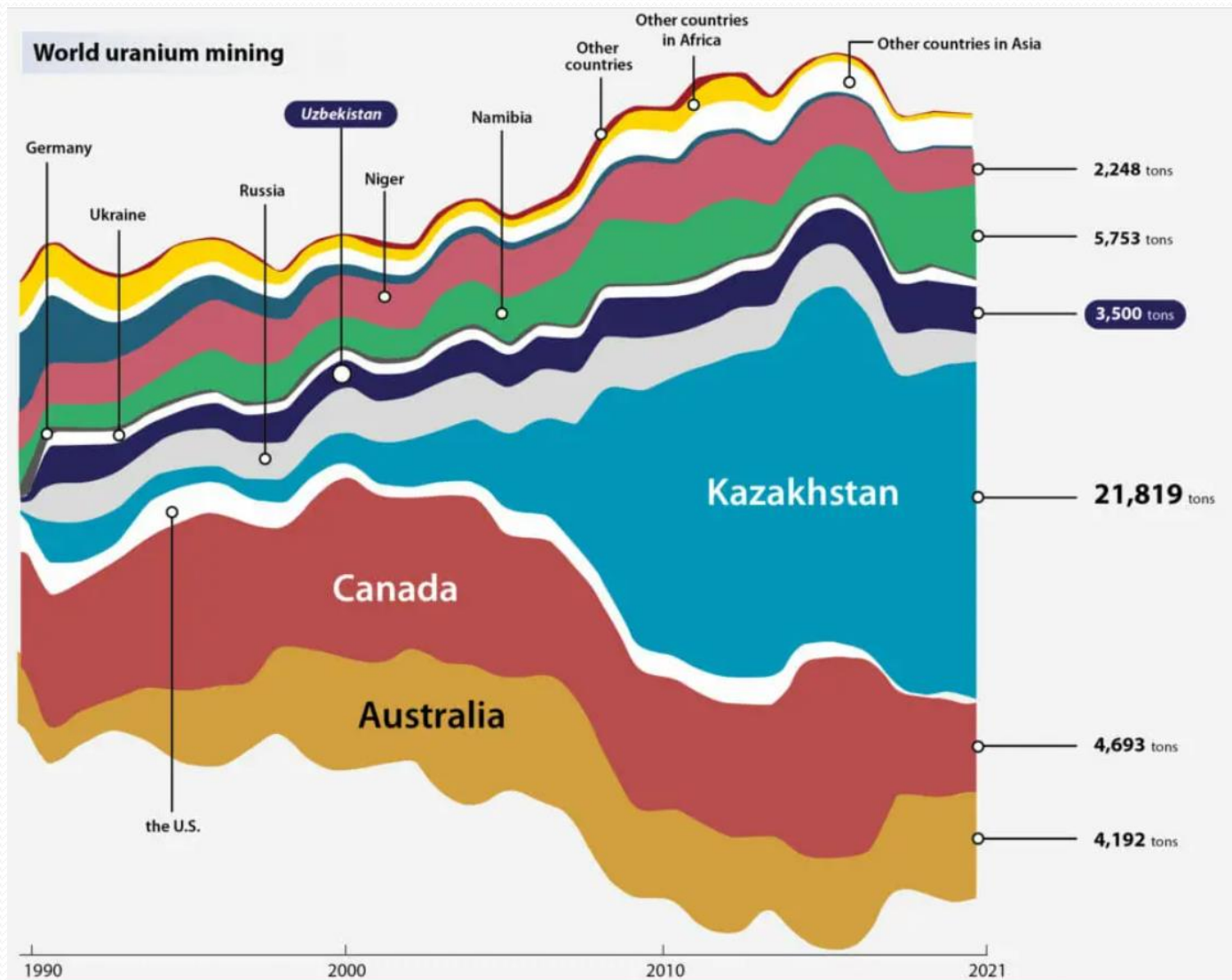
En fonctionnement dans 32 pays + Taïwan	410
En construction dans 15 pays (dont 21 en chine)	57
+ SMR + en commande ou projet (une centaine)	



Production 2022

	Tonnes Uranium	% monde
Kazakhstan	21227	43,0
Canada	7351	14,9
Namibie	5613	11,4
Australie	4553	9,2
Ouzbékistan	3300	6,7
Russie	2508	5,1
Niger	2020	4,1
Chine	1700	3,4
Inde	600	1,2
Afrique du S.	200	0,4
Ukraine	100	0,2
Etats-Unis	75	0,2
Pakistan	45	0,1
Brésil	43	0,1
Iran	20	0,0
TOTAL	49355	100,0

Production d'uranium à travers les âges : FOCUS années 1990 à 2021



L'uranium : une ressource comme les autres...

- Le **niveau** des ressources exploitables dépend de deux facteurs :
 - Du **coût d'extraction** (en \$/lb-U₃O₈) : < 40; <130; <260 (AIEA)
 - Du **degré de confiance** accordé aux estimations : « identifiées , raisonnablement assurées inférées ou pronostiquées, spéculatives »
- Mais les **coûts** de production **augmentent** (teneur des minerais diminue), et le temps de mise en production d'un gisement est long : au moins 10 ans (études techniques, réglementations, résistances locales, ...)
- Les nouvelles découvertes de gisement se raréfient
- Les ressources en U identifiées sont **suffisantes** « sur le papier » pour alimenter le parc nucléaire mondial jusqu'au **tournant de ce siècle** (si croissance modérée)

Sauf que...

**la durée de fonctionnement des réacteurs est de 60 ans (voir plus) :
un industriel prendra-t-il le risque de construire un réacteur en 2050 ?**

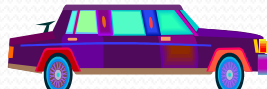
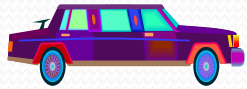
Uranium : le JACKPOT pour s'en passer !

Les “surgénérateurs” qui fabriquent plus de combustible qu’ils n’en consomment pour faire de l’électricité ¹ !

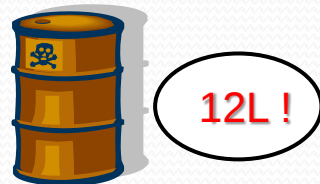
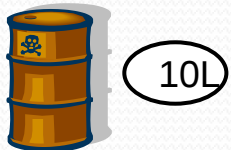
The comparison with a “breeding” car consuming 10 liters / 100 km

At the start ...

...At the arrival

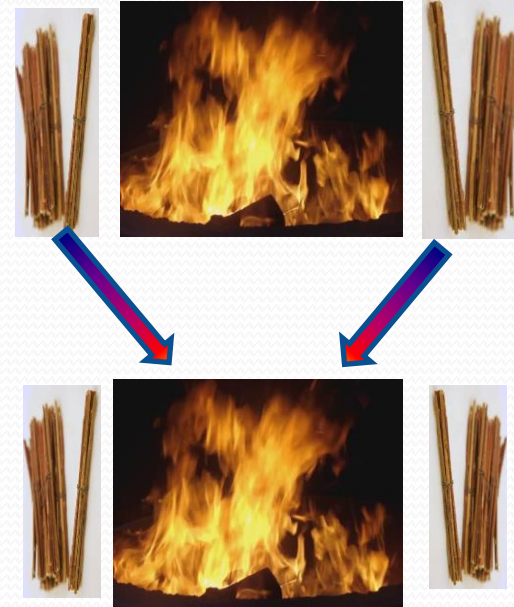


...100 km...



The image of dry and wet wood

“Dry wood” = U235 or Pu
to make fire (electricity)



“Wet wood”
(=U238) is “dried”
(transformed to
Pu239 to make a
new fire

...etc...

1 - Idée émise par Enrico Fermi en mai 1944

On sait faire en France (SPX, ASTRID), mais la politique en a décidé autrement

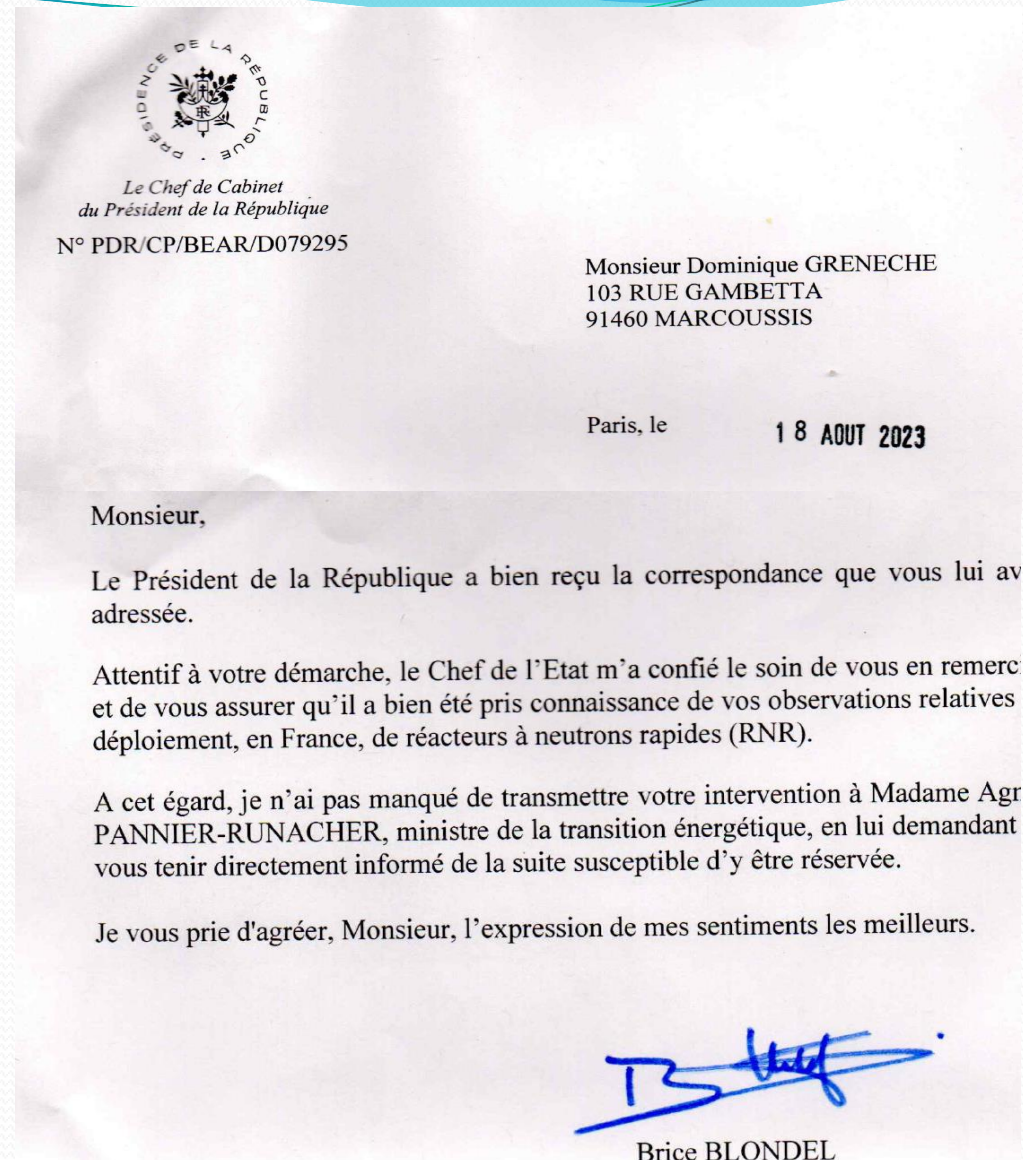
Macron le sait !!!

Ma lettre le 22 juin 2022 (1), avec
pour objet :

« L'urgence du nucléaire durable »
(copie en annexe)

La réponse de son chef de cabinet
est affichée ci-contre.

=====>



(1) – J'en ai informé Bernard ACCOYER ancien Président de l'Assemblée Nationale (auprès duquel je suis conseiller) qui m'a demandé s'il pouvait la « plagier », ce qu'il a fait (7/1/-2024) : voir annexe

Géopolitique de l'uranium : zoom sur quelques pays ou régions

- **La Chine** prévoit 200 GWe d'ici 2030 **(1)** et 400 à 500 GWe d'ici 2050. Elle possède 53,2 GWe installés à ce jour .
 - Elle a institué la **stratégie dite des « Trois Tiers »** dès les années 1990 visant à assurer l'approvisionnement par trois voies : la **production domestique** (*limitée car peu de gisements exploitables*), le **contrôle de mines à l'étranger** et le **recours aux marchés**.
 - Elle développe une **stratégie agressive à l'étranger**, notamment en Afrique (y compris au Niger, mais surtout en Namibie),
- **La Russie** a des **préoccupations similaires**. Ses ressources internes insuffisantes pour ses besoins domestiques + ses contrats d'exportation de combustibles nucléaires signés à ce jour. Cette stratégie se focalise en Asie centrale, et surtout au **Kazakhstan**. Le **rachat d'entreprises** → parts dans des gisements en dehors d'Asie centrale, surtout en **Afrique**.

Trois objectifs : 1 -remporter des contrats de **vente de réacteurs nucléaires** en adjoignant **la recherche d'uranium comme bonus**, 2 - exploiter d'autres minerais stratégiques présents dans les gisements; 3 - assurer une présence face à l'activisme chinois.

(1) – A titre de référence, la puissance installée en France est de 60 MWe (chiffre arrondi

Géopolitique de l'uranium : zoom sur quelques pays ou régions

Australie

A exclu pendant 30 ans toute vente d'uranium à la Chine, à l'Inde et à la Russie pendant trente ans (lutte ant contre la prolifération nucléaire).

- Mais elle est revenue sur cette politique à mesure que l'équilibre des forces s'est reconfiguré dans l'Indo-Pacifique.
- Réintroduction du « boycott » de la Russie en 2014 (signe de solidarité envers l'Ukraine – annexion Crimée)

Inde :

Pratiquement **pas de ressources d'uranium sur son territoire** (mais elle a beaucoup de thorium).

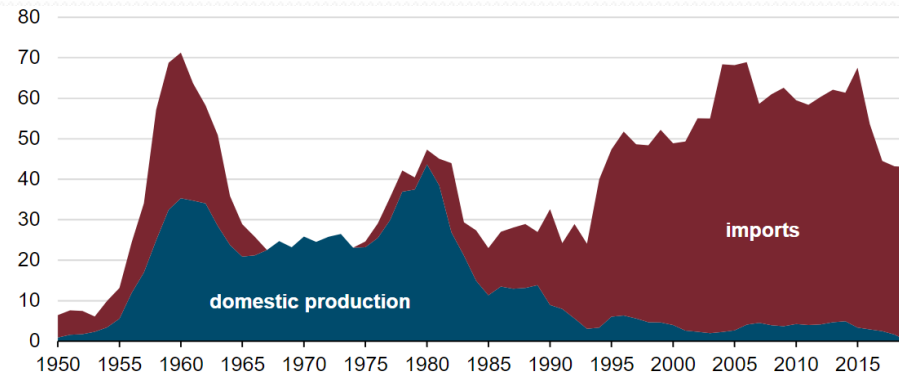
- **Embargo** sur ses **importations d'uranium** (+ boycott technologique) suite à sa série **d'essais de bombes atomiques de mai 1998** (après son premier essai du 18 mai 1974).
- Embargo qui n'a pas duré longtemps du fait du **tournant géopolitique majeur** des Etats-Unis après le **11 septembre 2001** : accord de coopération avec l'Inde est finalement signé par G Bush le 18 décembre 2006 (« United States-India Peaceful Atomic Energy Cooperation Act ») après un processus très alambiqué qui est **un mélange de compromis politiques et de contorsions réglementaires**. La France va pouvoir vendre 300 tonnes d'uranium à l'Inde en décembre 2008.

Géopolitique de l'uranium : zoom sur quelques pays ou régions

Etats-Unis

Années 1940 et 1950 : des incitations financières pour stimuler la production domestique qui a ensuite diminué considérablement (suppression des barrières commerciales et chute des prix

En millions de livre U3O8



- En 2020, le Congrès a établi une réserve stratégique qui sert d'approvisionnement de secours et encourage la production nationale d'uranium
- En 2022 : Canada, 27%; Kazakhstan 25%; d'Ouzbékistan 11 %; Australie 9 %; USA 5% (le Dépt de la Défense s'agite (réacteurs de propulsion). **Russie autour de 12 % en 2019** et **24 % pour l'uranium enrichi !**)
- Mais aujourd'hui, un projet de loi, est en cours d'adoption au Sénat pour supprimer à terme les importations en provenance de la Russie : quelques dérogations sont prévues : de l'ordre de 500 tonnes par an (1) jusqu'en 2027, et arrêt total au-delà.

(1) - Un réacteur de 1 GWe consomme autour de 160 tonnes d'Unat par an

Des inquiétudes au NIGER

- le groupe **ORANO** : **2 sociétés minières** (Somaïr et Cominak)
- En **septembre 2010**, **5 Français** ont été pris en **otage** par Al Qaida : 4 n'ont été libérés qu'en octobre 2013 contre rançon (12 M€?), malgré un contrat de sécurité signé à l'époque avec les autorités
- AREVA (ex) a été mise en examen en juin 2022 pour « blessures involontaires » par manque de sécurité !
- On finance toujours **l'hôpital construit par AREVA** dans ce pays.
- **L'uranium rapporte pas mal d'argent** au pays dont les dirigeants prélèvent (discrètement) une (bonne) partie pour arrondir leurs fins de mois (résidence à La Celle-Saint-Cloud, 5 appartements à Paris (location), un à New York dans Manhattan.
- Orano a annoncé le 8 septembre la **mise sous « maintenance anticipée »** de **Somaïr**, faute d'approvisionnements suffisants pour faire tourner le site (sanction de la Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest)
- La chine en embuscade (une mine à Azelik dans le centre du pays)



Coup d'état 28/7/2023 - G^{al} Tchiani

Depuis 1950 **221 coups d'États** en Afrique
106 réussis et 108 ratés : au palmares

1. Le Soudan 17 (or)
2. Burundi : 11 (argent)
3. Ghana : ex aequo avec Sierra Leone : 10



Greenpeace vous informe

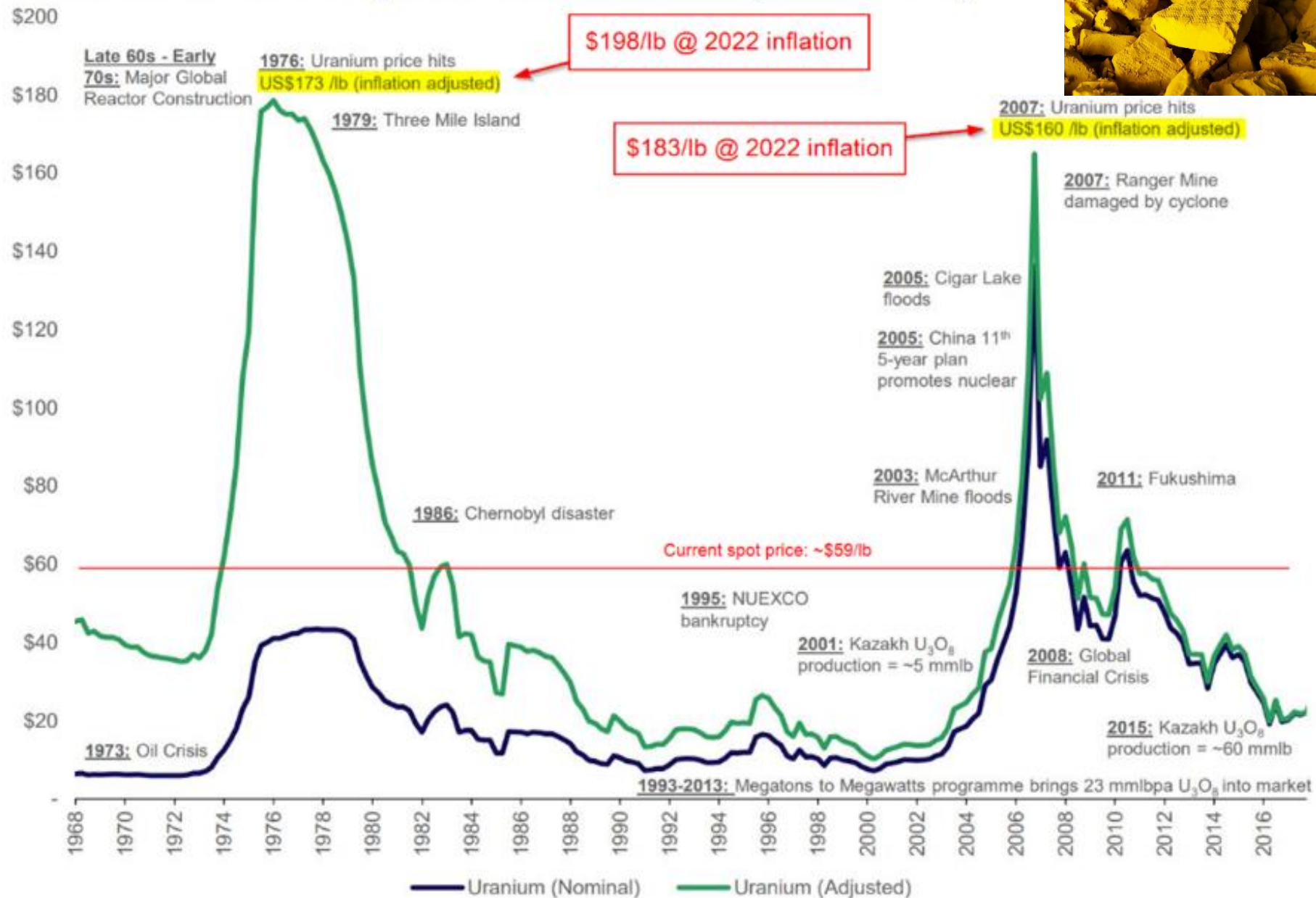
Les prix de l'uranium : un marché très particulier

- Le prix de l'uranium se forme sur un marché peu institutionnalisé : les échanges ne se font pas sur une place boursière mais via un **processus assez opaque** entre opérateurs miniers, utilisateurs finaux et intermédiaires, avec une place grandissante d'acteurs spéculatifs
- Il n'existe pas d'OPEP de l'uranium

La part du coût de l'uranium dans le coût global de l'électricité nucléaire est faible : < 5 %

(calcul : 20 t /TWh → 3,25 €/MWh ; Prix moyen vente électricité (2023) : 210 €/MWhe - Rapport : 1,5 %)

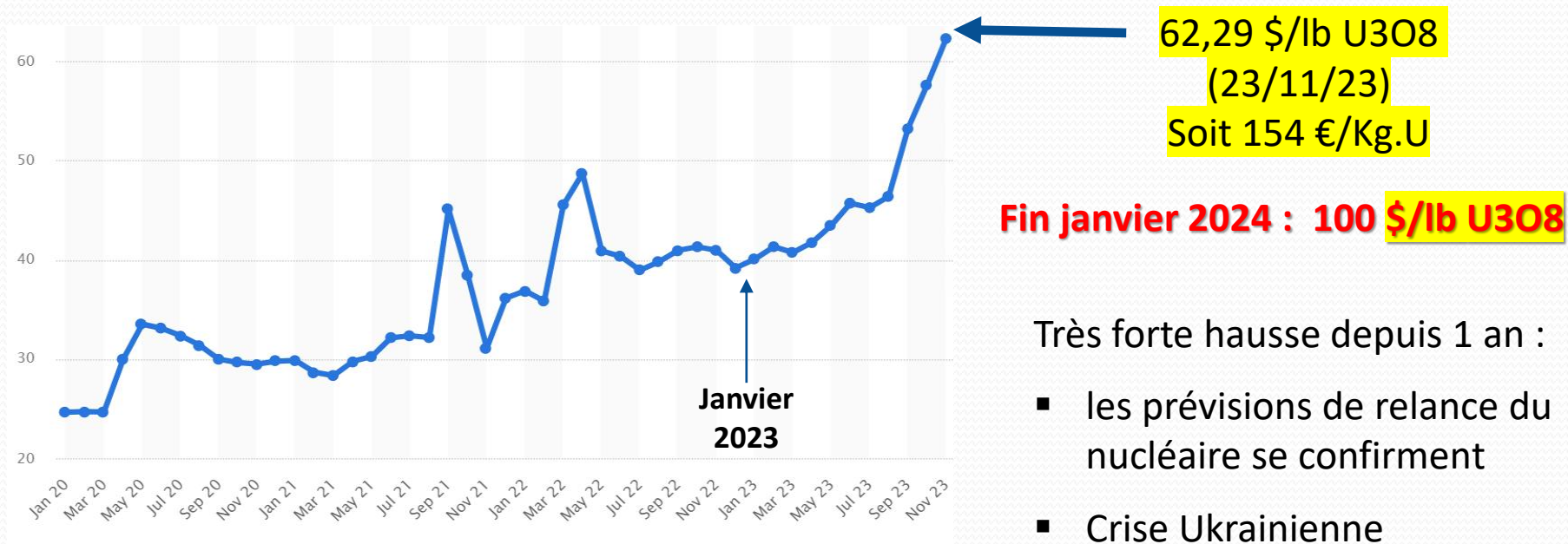
Historical Inflation Adjusted Uranium Price (1968 – 2016)



Les prix de l'uranium : très fluctuants

- Jusqu' à la fin des années 1970 : prix assez élevés
- période des années 1980 et 1990 : prix déprimés (certaines mines mises sous cocon)
- A partir du début des années 2000, les prix se sont redressés : pic en 2007
- Depuis : lente décroissance des prix (brusque après Fukushima)
- Reprise à la hausse depuis 2020 : sans doute durable

Prix « spot » de l'uranium
en \$/lb U3O8



Une livre (lb) U3O8 = 0,38465 Kg U et 1 \$ = 0,95 €

Et demain ? - Pour la Conversion et l'enrichissement

- Conversion (U en UF6) : des **tensions** également possibles. **Rosatom** monopolise **30 % des capacité mondiales** → volonté de certains pays occidentaux de s'affranchir de cette contrainte même si il existe encore des capacités importantes dans certains pays (dont la France) qui doivent suffire à couvrir les besoins : là encore **des investissements sont nécessaires : ils sont en cours en France**
- Enrichissement : les **capacités mondiales** existantes et en construction sont globalement **suffisantes** :
 - Les plans de développement prévus par Orano (extension GB2 engagée) et Urenco et CNNC **couvrent la demande jusqu'au milieu des années 2030**.
 - Cela étant, vu l'inertie du secteur de l'uranium (constantes de temps = plusieurs années), toute montée de tension sur les « services d'enrichissement » doit être anticipée plusieurs années à l'avance (GBII : 2 – 3 ans)

Et demain ? - Pour l'uranium (1/2)

- **Il y a une grande inertie dans le développement du nucléaire (UC = 10 ans) →** Le rythme actuel de croissance du parc nucléaire ne peut pas s'infléchir dans les 10 ans à 20 ans qui viennent (sauf cygne noir !).
- Les prévisions [1] de la croissance du parc nucléaire mondial sont un quasi doublement d'ici 2040 : 686 GWe en puissance installée au lieu de 369 au jourd'hui (AIEA)
- Les besoins annuels en uranium passeront de 65 000 tonnes à 130 000 tonnes en 2040
- Or le **délai** minimum **entre découverte d'un gisement et début de production** d'uranium = 10 ans + → d'importants investissements sont donc à prévoir pour assurer les approvisionnements à temps, faute de quoi de fortes tensions peuvent apparaître
- Les Etats-Unis développent un plan d'indépendance en faveur de leur industrie uranifère et certains pays européens comme la Slovaquie réouvrent leur mine..

[1] 21^{ème} édition du rapport biannuel « *Nuclear Fuel Report* World Nuclear Association

Et demain ? - Pour l'uranium (2/2)

- **La production issue de certaines grandes mines existantes chutera de moitié à partir de 2030**, par l'épuisement des réserves exploitables (à des coûts raisonnables) : Cigar Lake (Canada), Four Mile (USA), Budenovskoye 2, et Central Mynkuduk (Kazakhstan). Ces quatre mines représentent en effet un quart de la production mondiale
- Il existe plusieurs **sources dites « secondaires »** (roues de secours) pour pallier d'éventuelles tensions sur le marché de l'U
 - Stocks des électriciens : EDF = 30 000 tonnes (= 4 ans de consommation)
 - Réenrichissement d'U appauvri (350 000 t en France = au moins 10 ans de consommation annuelle)
 - Recyclage de l'uranium issu du retraitement (URT)
 - Diminution teneur de rejet des usines d'enrichissement (mais augmentation UTS)
 - Reprise activité minières sur le sol national (« racler les fonds de tiroir »)
 - Augmentation recyclage plutonium (MOX)

Le retraitement du combustible usé (CU): ombres et lumières

SUJET TRES SENSIBLE STRATEGIQUEMENT ET GEOPOLITIQUEMENT

1. Options opposées selon les pays : retraitement, stockage direct, « wait and see »
2. La crainte du développement d'une technologie « proliférante » (séparation plutonium)
 - Trois acteurs : France, Russie, Japon. Mais bientôt la chine (+ GB, anciennement)
 - France :
 - Clients passés = Pays Bas, Suisse, Japon, Allemagne, Belgique
 - procédé vendu au Japon
 - Discussion en cours avec la Chine
 - **USA : prohibition** depuis 1979 (Carter)
 - Corée du Sud : interdite de retraitement

Et « l'Europe, l'Europe, l'Europe »

« Alliance nucléaire » de 14 pays (16 mai 2023)*

- « ont réaffirmé leur engagement à poursuivre le renforcement de la coopération européenne dans le domaine de l'énergie nucléaire en tant que composante importante de l'ambition énergétique et climatique de l'Europe »
- « l'énergie nucléaire pourrait fournir **jusqu'à 150 GW de capacité** électrique **d'ici 2050** à l'Union européenne (contre environ 100 GW aujourd'hui). (= « l'équivalent de 30 à 45 nouveaux grands réacteurs et SMR ».
- « ... nécessité de veiller à ce que l'Europe continue à **réduire sa dépendance à l'égard des importations russes** »: = cycle du combustible
- Domaines évoqués : Sûreté et gestion des déchets, Industrialisation et souveraineté (sécurité de l'approvisionnement en combustibles nucléaires et radioisotopes), compétences, innovation.



*https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/16_05_23_REUNION_DES_PAYS_MEMBRES_DE_L%E2%80%99ALLIANCE_DU_NUCLEAIRE_A_PARIS.pdf - Belgique, Bulgarie, Croatie, Estonie, Finlande, France, Hongrie, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovénie, Slovaquie, Suède + Royaume-Uni (invité) et Italie (observateur)

Et « l'Europe, l'Europe, l'Europe »



« Traité EURATOM » : ESA (création 1960)

(officiellement l'Agence d'approvisionnement de la Communauté européenne)

- Mission principale : garantir la **sécurité de l'approvisionnement** en matières nucléaires et en combustible nucléaire pour tous les utilisateurs de l'UE.
- Utilisateurs : producteurs d'énergie nucléaire, réacteurs de recherche, des producteurs de radio-isotopes à usage médical, entreprises de la chaîne d'approvisionnement nucléaire.
- **Surveille le marché nucléaire** et signale les tendances qui constituent une menace pour la sécurité d'approvisionnement de l'UE y compris sur la disponibilité de combustibles et de matériaux spécialisés à des fins médicales et de recherche)
- Peut signer des contrats pour la fourniture de minerais, de matières brutes et de matières fissiles spéciales dans l'UE, et elle peut refuser de conclure un contrat. Mais en pratique, **vendeurs et acheteurs d'uranium peuvent négocier seuls**, mais doivent en référer à l'agence qui contresigne ou non les contrats
- **Les tensions entre pays membres ont amené à limiter les capacités d'action concrètes de l'ESA :** ce sont les exploitants des réacteurs qui formulent les politiques d'approvisionnement (en lien avec leur gouvernement). Pour la **France**, le mot d'ordre (DGEMP) est **diversification** à tous azimuts. **La Hongrie fait appel à la Russie** depuis l'arrivée au pouvoir de Viktor Orban

En marge du G7 : déclaration sur la coopération civile en matière de combustible nucléaire entre les États-Unis, le Canada, la France, le Japon et le Royaume-Uni (17 avril 2023)*

- **Identification de domaines de collaboration** sur les combustibles nucléaires afin de soutenir l'approvisionnement stable en combustibles pour les parcs de réacteurs en activité d'aujourd'hui,
- Efforts visant à exploiter les ressources et capacités uniques que possèdent les secteurs nucléaires civils de chaque pays pour **établir un marché mondial du combustible nucléaire commercial**.
- **Collaboration** dans l'extraction, la conversion, l'enrichissement de l'uranium et la fabrication de combustible afin de « *renforcer nos secteurs nationaux et d'établir des règles du jeu équitables pour concurrencer plus efficacement les fournisseurs prédateurs (« predatory suppliers») »*.
- **Objectif : réduire la dépendance à l'égard de la Russie dans la chaîne d'approvisionnement en combustible nucléaire à long terme**, y compris pour la fourniture de technologies nucléaires civiles à des pays tiers (soumise aux lois, réglementations et accords internationaux en vigueur).

* <https://www.energy.gov/articles/statement-civil-nuclear-fuel-cooperation-between-united-states-canada-france-japan->

Plan

- **Le cycle du combustible**
 - Vue d'ensemble
 - L'uranium
 - L'enrichissement
 - La fabrication du combustible
 - L'aval du cycle
- **Aspects géopolitiques**
 - La fabrication du combustible : des enjeux industriels
 - L'enrichissement : le risque de prolifération nucléaire
 - L'uranium : le nerf de la guerre
- **CONCLUSION**

➤ La **géopolitique** du cycle du combustible nucléaire, résulte d'une combinaison de **plusieurs facteurs** (souvent liés). Les plus déterminants sont :

- **Héritage historique** (armement nucléaire, patrimoine scientifique),
- **Déséquilibre** entre **ressources** domestiques et **besoins** nationaux
- **Niveaux de développement** technologique,
- **Stratégies** nationales dans le domaine de **l'énergie**
- Options retenues **gérer les combustibles usés**
- Les postures diverses en matière de **prolifération nucléaire** (lien civil-militaire)

➤ Il n'est **pas possible** pour un pays exportateur d'uranium naturel d'utiliser la **menace d'une rupture d'approvisionnement** comme mesure coercitive, compte tenu :

- de la facilité de rediriger les sources d'uranium (diversité géographique)
- des capacités de stocker préventivement de grandes quantités d'uranium
- Des possibilités de faire appel à des sources secondaires (réenrichissement)

L'uranium a ainsi plus une valeur de symbole dans les relations internationales. Mais c'est parfois un **bon outil diplomatique** (et parfois un engin d'intoxication de certains malfaisants)

➤ **L'enrichissement de l'uranium** présente de **forts enjeux géopolitiques** étant donné la **consanguinité** de cette technologie pour les **applications civiles et militaires**

Les RNR : vite vite !

- Enrico Fermi – 1945 : « *The country which first develops a breeder will have a great competitive advantage in atomic energy* ».
- EBR1 (1951, Idaho) : 1^{er} réacteur civil au monde fut un RNR
- 14 RNR industriels ont fonctionné dans les grands pays nucléaires et ils fonctionnent aujourd'hui en Russie ou vont bientôt démarrer en Inde (cette année) et en Chine(2025)
- **La France possède aujourd'hui les meilleurs atouts au monde** pour lancer dans les meilleurs délais un programme volontariste sur cette filière : **maitrise totale de la technologie des RNR-Na, expérience unique sur le traitement de combustibles usés et le recyclage du Pu grands stocks d'uranium appauvri** (plus de 330 000 tonnes à ce jour) qui assurent la production totalement autonome d'EN pour des milliers d'années.

Or, les temps de développement et de maturité des filières nucléaires se chiffrent en décennies ➔ il faut travailler très activement dès aujourd'hui à leur mise au point.

Faute de quoi, nous n'aurons plus qu'à acheter la technologie des RNR aux chinois en méditant cette déclaration de Douglas MacArthur :

« Les batailles perdues se résument en deux mots : trop tard ».

Atoms for peace !



Merci : des Questions ?

Monsieur Dominique GRENECHE
Expert international en énergie nucléaire, docteur ès sciences
103 rue Gambetta – 91460 Marcoussis

à

Monsieur Emmanuel Macron,
Président de la République Française
Palais de l'Élysée – 55 de la rue du Faubourg-Saint-Honoré
Paris - 75008

Objet : L'urgence de l'énergie nucléaire durable

Monsieur le Président de la République,

J'ai l'honneur d'attirer votre attention sur l'intérêt majeur pour la France de déployer au plus vite des réacteurs nucléaires à neutrons rapides (RNR) régénérateurs de matières fissiles. Ce processus est basé sur la fabrication dans le réacteur même de plutonium fissile (donc du carburant) à partir d'uranium appauvri et en quantités au moins équivalente à celle que consomme le réacteur pour produire de l'électricité. Cette spécificité exceptionnelle des RNR permet de s'affranchir à terme de toutes nos importations en uranium naturel et de parvenir de ce fait à une indépendance totale pour produire notre énergie nucléaire pendant des millénaires. C'est une réalité scientifique et technique incontestable validée par l'expérience internationale significative acquise sur ces réacteurs nucléaires.

Pour mieux appréhender les enjeux de cette entreprise, permettez-moi de souligner ici les deux éléments fondamentaux qui justifient le déploiement rapide de ces RNR régénérateurs :

1. Selon les estimations communes de l'AIEA et de l'OCDE, les ressources assurées ou présumées en uranium naturel exploitables à des coûts raisonnables sont de l'ordre de 12 millions de tonne (15 millions de tonnes en acceptant de payer 4 à 5 fois le prix moyen du marché à long terme de l'uranium). Ces évaluations sont unanimement validées par les spécialistes du secteur minier.
2. Compte tenu de ces limites et de la consommation actuelle dans le monde (autour de 60 000 par an), une grave pénurie de ressources en uranium se profile à la fin de ce siècle, même en admettent une croissance modeste du parc mondial de réacteurs nucléaire (dont le rythme s'intensifie pourtant actuellement).

Etant donné l'inertie qui caractérise la réalisation de nouveaux projets dans le secteur nucléaire, et compte tenu des réalités industrielles, il apparaît indispensable de lancer au plus vite un programme vigoureux de développement des RNR régénérateurs sachant que le rythme de croissance d'un parc de réacteurs nucléaires de ce type est limité par la disponibilité du plutonium produit par les réacteurs existants. A cet effet, il me semble de la plus haute importance de **relancer au plus vite le projet de réacteur démonstrateur ASTRID**, qui marquerait le véritable point de départ d'un tel programme. Cette

décision serait d'autant plus fondée que nous sommes le seul pays au monde qui rassemble tous les atouts pour déployer ces RNR à grande échelle. En, effet :

- Nous possédons une expérience unique au monde sur cette technologie, grâce à notre vaste programme passé de R&D couronné par la construction et l'exploitation des RNR de puissance Phénix et Superphénix (ce dernier ayant été brusquement arrêté en 1997, comme vous le savez, pour des raisons purement politiques).
- La France bénéficie d'un savoir-faire industriel inégalé sur le traitement de combustibles usés et le recyclage du plutonium qui est évidemment nécessaire au fonctionnement des RNR. Permettez-moi de rappeler à cet égard que nous étions très proche de la signature d'un accord avec la chine pour leur vendre notre technologie, comme vous l'aviez annoncé dans votre communiqué publié le 6 novembre 2019 à l'issue de votre visite d'état en Chine.
- Nous avons accumulé sur notre territoire national d'énormes quantités d'uranium appauvri (330 000 tonnes à ce jour) qui sécurisent l'alimentation d'un parc ce RNR pendant plusieurs milliers d'années et qui élimine ainsi tous nos besoins d'importation d'uranium naturel.

J'ajoute que les grands pays industriels tel que la Russie, la Chine et l'Inde ont d'ores et déjà construit (ou achèvent la construction) de prototypes industriels de RNR. A noter sur ce point que les USA restent sur la réserve dans ce domaine, étant donné leurs énormes ressources énergétiques domestique et la persistance de leur position politique hostile au retraitement des combustibles usés et au recyclage du plutonium.

Reste chez nous la volonté politique qui ne peut émaner que de vous s'agissant d'une question aussi stratégique pour l'avenir énergétique à long terme de la France et pour la lutte efficace contre le réchauffement climatique via le développement d'un moyen de production massive d'énergie débarrassée d'émissions de gaz à effet de serre.

Je vous remercie, Monsieur le Président, de l'attention que vous avez bien voulu porter à mon courrier et je vous prie de croire en l'expression de ma haute considération.

Dominique GRENECHE

PS : je suis expert auprès de l'ONG Patrimoine Nucléaire et Climat, PNC, présidée par Monsieur Bernard ACCOYER, ancien Président de l'Assemblée Nationale

7 janvier 2024

Monsieur Emmanuel Macron,
Président de la République Française
Palais de l'Élysée
55 de la rue du Faubourg-Saint-Honoré
Paris - 75008

Monsieur le Président,

À l'approche du prochain Conseil de Politique nucléaire, je souhaite attirer votre attention sur un sujet d'importance stratégique et écologique majeure, négligé par les services du gouvernement. Ce sujet touche à la garantie à moyen et long terme de notre approvisionnement en électricité décarbonée, à notre souveraineté énergétique, au respect des ressources naturelles et à la diminution des déchets nucléaires de haute activité déjà produits, avantages apportés par le nucléaire durable.

Les crises successives du marché de l'énergie montrent que l'énergie nucléaire est une ressource indispensable à la France pour restaurer son indépendance énergétique et disposer à tous moments de l'électricité décarbonée nécessaire au fonctionnement de son économie. Vous avez annoncé en février 2022 à Belfort des objectifs plaçant le nucléaire au rang de socle de notre système énergétique, et annonçant la construction de nouveaux EPR, le développement de petits réacteurs modulaires (SMR) et de quelques concepts innovants.

Ces crises ont en particulier confirmé que la politique de l'énergie s'inscrit dans le temps long, et exigeant une vision à très long terme, de l'ordre du siècle. Certes, les annonces de Belfort réorientent la politique énergétique nationale sur le court/moyen terme, mais elles doivent être complétées par une vision de l'approvisionnement en électricité de notre pays bien au-delà des années 2050.

Les Académies et tous les organismes scientifiques s'accordent à reconnaître dans une logique de développement durable –au sens onusien du terme– que cet approvisionnement devra impérativement s'appuyer sur des réacteurs surgénérateurs de 4^{ème} génération. En effet, ceux-ci permettent de recycler les déchets de haute activité des réacteurs actuels et de consommer le stock d'uranium appauvri disponible sur le territoire national, suffisant pour assurer la production de l'électricité nécessaire pendant plusieurs milliers d'années.

Aucune autre source d'énergie pilotable acceptable au plan environnemental n'offre une telle perspective de façon fiable, d'autant plus que l'OCDE et l'AIE anticipent des tensions sur le marché de l'uranium dès le milieu de ce siècle. C'est pourquoi PNC-France vous appelle solennellement à traiter cette question lors du prochain Conseil de Politique nucléaire et à décider d'engager le développement d'un réacteur démonstrateur à neutrons rapides, dans une perspective de surgénération.

Cette décision serait d'autant plus fondée que la France est le seul pays au monde à rassembler tous les atouts pour déployer ces Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR), de la technologie des réacteurs au cycle du combustible. Cet acquis résulte de l'expérience acquise par la construction et l'exploitation des réacteurs Rapsodie, Phénix et Superphénix et des travaux engagés dans le cadre du projet Astrid, jusqu'à sa suspension en 2019.

LETTRE PNC AU PRESIDENT DE LA REPUBLIQUE (7/1/2024)

OBJET : NUCLEAIRE DURABLE (RNR)

L'assurance de disposer de moyens de produire une électricité décarbonée et pilotable, disponible pour de nombreuses générations, repose sur le déploiement de ces réacteurs surgénérateurs dès la seconde moitié de ce siècle, ce qui implique la construction d'un démonstrateur de puissance intermédiaire à l'horizon 2050 au plus tard. C'est ce que font aujourd'hui les pays nucléaires majeurs et seule une relance rapide de ce programme dans notre pays permettra de conserver notre acquis scientifique et technologique.

Sur un domaine aussi vital, la politique nationale ne peut s'improviser. L'État a la responsabilité de fixer les objectifs et la ligne politique à long terme, puis de veiller à sa mise en œuvre par les acteurs concernés. La « *Stratégie Française énergie-climat* » et les documents associés (SNBC3, PPE3, ...), en cours d'élaboration, doivent intégrer cette vision stratégique alors que le vecteur électrique s'impose pour se substituer à une large part des usages actuels des énergies fossiles carbonées, qui représentent encore 60 % de notre consommation d'énergie finale.

La lutte constante contre le dérèglement climatique, la restauration durable de notre souveraineté énergétique et de notre puissance industrielle, l'utilisation optimale de nos ressources naturelles ainsi recyclées et de notre capital scientifique et technologique doivent primer et être traduits en objectifs explicites dans les documents de programmation en cours d'élaboration.

Je vous remercie, Monsieur le Président de la République, de l'attention que vous voudrez bien porter à notre demande, ce qui exige de porter la réflexion stratégique jusqu'à la fin du siècle et même au-delà, et je vous prie de croire en l'expression de ma haute considération.

Bernard Accoyer

Président PNC-France