


Minerais et extraction

Transparents de
Bernard Poty

Matières nucléaires

Les Matières nucléaires

U naturel :

- ^{238}U : 99,3 %, non Fissile, Fertile  ^{239}Pu
- ^{235}U : 0,7 %, Fissile
 - REL : 3,5 - 5 %
 - Armes : > 93 %

^{232}Th (Fertile, U-Pu)

-  ^{233}U (Fissile)
- REL et Surgénérateurs

Distillation manteau-croûte

Les processus thermiques, chimiques et dynamiques sont très fortement couplés dans le manteau des planètes.

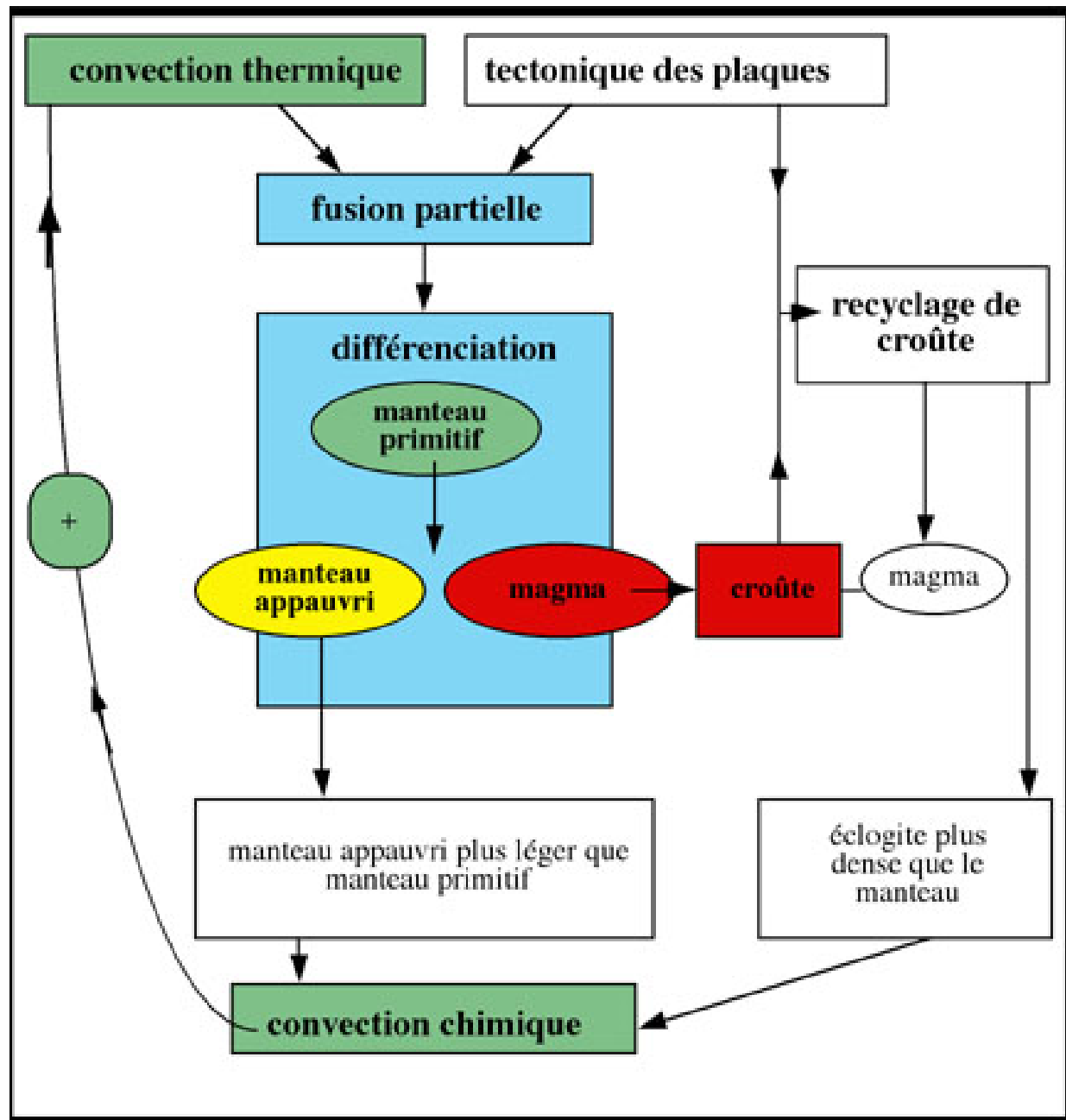
La **convection thermique** permet la formation de zones ascendantes chaudes et donc de zones de fusion partielle.

Lorsqu'une roche de manteau primitif arrive dans une zone de fusion partielle, certains éléments fondent pour former un liquide magmatique, qui est extrait en surface pour former la **croûte**.

La roche résiduelle est alors une roche de **manteau appauvri** (sous-entendu en éléments magmatophiles). Or, cette roche appauvrie est plus légère que la roche primitive : La différenciation crée donc des hétérogénéités chimiques et donc une **convection chimique** qui va s'ajouter à la convection thermique.

Par ailleurs, la croûte ainsi formée est recyclée par enfouissement dans les zones de subduction sur Terre. Ce recyclage crée à son tour une convection chimique qui se rajoute à la précédente. Etc.....

Distillation géochimique



Processus de transfert

Formation des gisements d'Uranium

Roche source > Dissolution > Dépôt
Migration

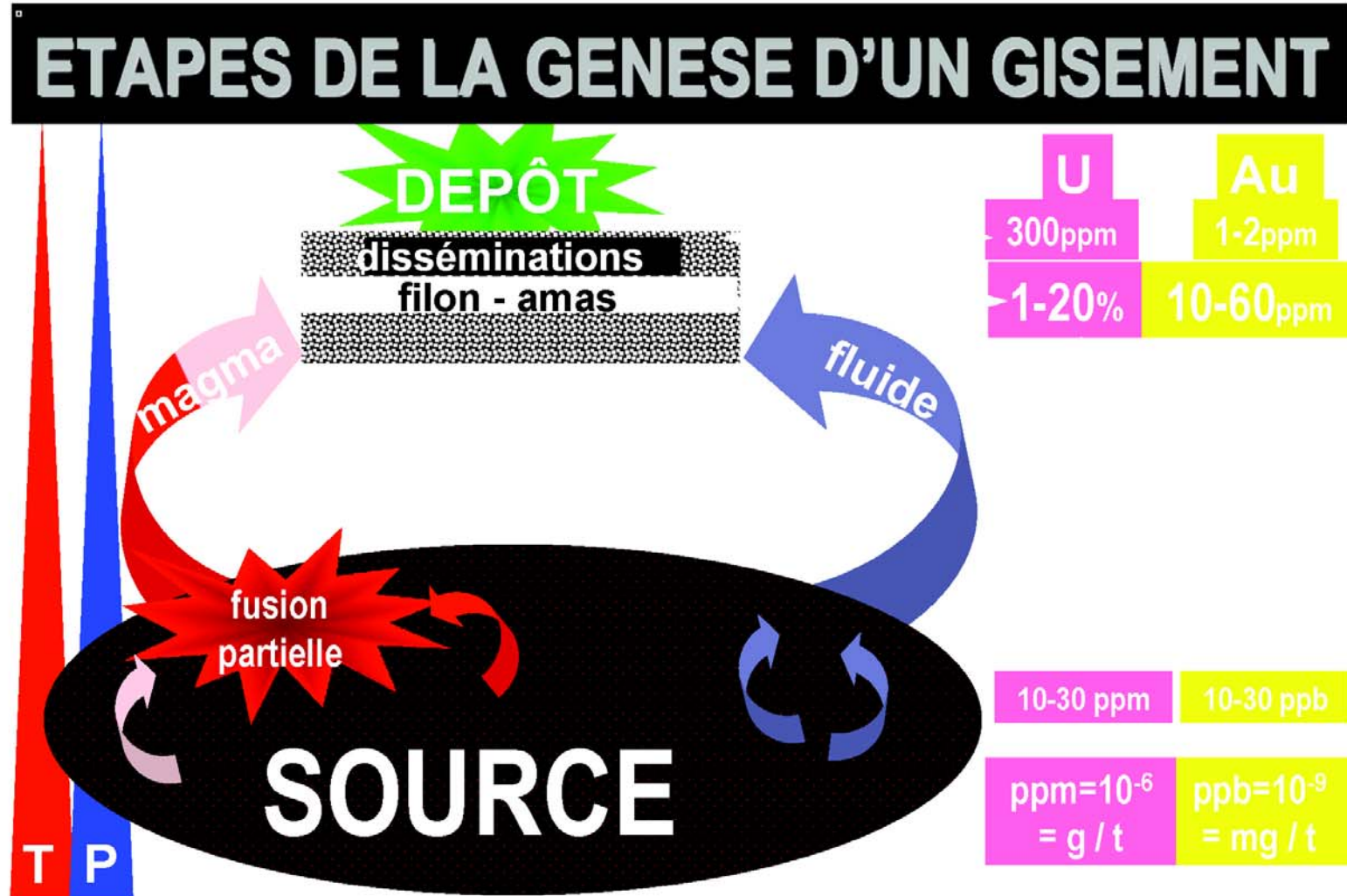


Facteurs clés

Facteurs clef pour la genèse des gisements d'uranium

- Source de l'uranium
- efficacité de l'extraction et du transport
- efficacité du piégeage

Genèse



Les basaltes

• **La série tholéitique** : le rapport Na-K/SiO₂ est faible et le magma est saturé (il n'y a pas de feldspathoïdes).

Le magma de départ est un basalte tholéitique (très pauvre en silice) que l'on rencontre généralement au niveau des dorsales océaniques, des arcs insulaires et dans le volcanisme continental (trapps). Le basalte tholéitique se forme à faible pression (donc en faible profondeur) à partir du manteau. Ensuite par enrichissement progressif (contamination, cristallisation fractionnée) du magma, il y a formation d'andésites (islandites) puis de rhyolites. Le stade basalte est le plus courant.

• **La série calco-alkaline**: le rapport Na-K/SiO₂ est plus fort. Na est dominant par rapport à K. Cette série se rencontre dans les zones de subduction (Cordillères) et les arcs insulaires évolués. Elle commence par des basaltes et va jusqu'aux rhyolites. Le stade intermédiaire andésitique est le plus courant.

• **La série alcaline** : le rapport Na-K/SiO₂ est fort. Les minéraux caractéristiques sont l'olivine et les feldspathoïdes, c'est donc un magma sous-saturé. Cette série se rencontre dans le volcanisme des domaines continentaux stables. Elle va des basaltes aux trachytes. Le stade basalte est dominant. Le magma ne se forme qu'à haute pression.

Manteau appauvri en Al (Si/Al)

Péridotites

Les péridotites sont principalement constituées d'olivine et de pyroxènes

- Olivines : La formule générale des olivines est $XYTO_4$, où :
 - T = cation tétraédrique (Si)
 - Y = cation bivalent dans les sites octaédriques M2
 - X = cation bivalent dans les sites octaédriques M1

La composition des olivines naturelles est comprise dans un tétraèdre ayant par sommets les phases :

- Forstérite (Fo) : Mg_2SiO_4
- Fayalite (Fa) : Fe_2SiO_4
- Tephroite : Mn_2SiO_4
- Calcio-olivine : Ca_2SiO_4

Pyroxènes

La structure des pyroxènes est celle des plus simples inosilicates, c'est-à-dire un assemblage de chaînes simples de complexes tétraédriques SiO_4 .

De ce fait, le rapport Si/O vaut 1/3, avec une période de chaîne de $(SiO_3)_n$.

La formule générale d'un pyroxène est par conséquent $XY(SiO_3)_2$,

où X est un gros cation (Na^+ , Ca^+ , Li^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} ...) et

Y un cation de taille moyenne

(Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Cr^{3+} , Ti^{4+} ...)

Réservoirs

Principaux Réservoirs

ppm	U	Th
Croûte Continentale	1,3	6,5
Basalte tholéitique	0,14	0,5
Basalte alcalin	0,53	3,9
Manteau appauvri (peridotite)	0,010	0,040
Manteau primitif	0,020	0,070
Chondrites (carbonées ou à enstatite)	0,008	0,030
Mer	0,0033	

Roches

Processus de concentration

ppm	U	Th
Basalte tholéitique	0,14	0,5
Basalte alcalin à olivine	0,53	3,9
Granite alcalin	10-50	30-100
Granite peralumineux	5-30	5-20
Granite monzonitique (MB)	7-12	19-50
Granite calcoalcalin	3-4	12-15
Péridotite	0,010	0,040

Minéraux

Les Minéraux d'Uranium

Uraninite : $\text{UO}_{2,x}$

Coffinite : USiO_4

Brannérite : $\text{UO}_2 \cdot 2\text{TiO}_2$

Thorite : $(\text{Th},\text{U}) \text{SiO}_4$ $\text{USiO}_4 > 40\text{m}\%$

Allanite (épidote Ce) : $\text{U} > 650 \text{ ppm}, \text{ThO}_2 : 2,5\%$

Monazite (Ce, La, ...) PO_4 $\text{U} > 2\%$ $\text{ThO}_2 : 4 - 20\%$

Apatite : $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl}) : > 200 \text{ ppm}$ (1000)

Zircon : $\text{SiO}_4\text{Zr} : n \times 100 \text{ ppm}, (6\ 000)$

Minéraux oxydés

Minerais

Brannerite

$(U^{4+}, REE, Th, Ca) (Ti, Fe^{3+}, Nb)_2 (O, OH)_6$



Uraninite (Pechblende)

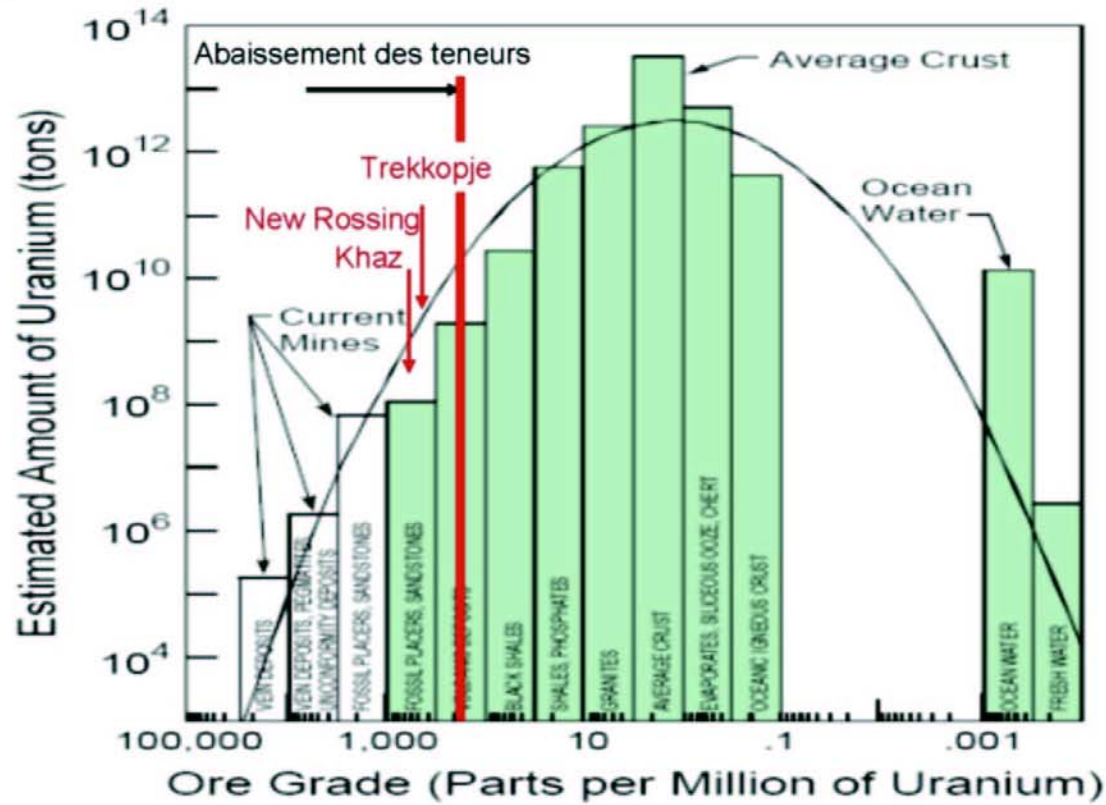
UO_2



Distribution des teneurs



Il y a beaucoup d'Uranium sur terre, mais à des teneurs très variables...



Et dans l'eau.....mais c'est anecdotique

- **Concentration moyenne des océans : 3.3 ppb U soit 4 milliards de tonnes d'uranium dissoutes !**
- **Apport annuel de toutes les rivières d'environ 1300 tonnes d'uranium.....**

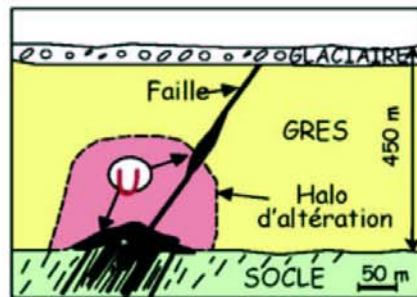
Types de gisements



Types de Gisements

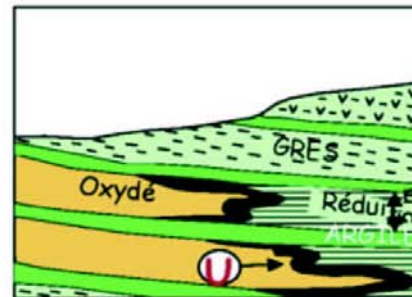
Deux types de Gisements fournissent actuellement l'essentiel de la production mondiale:

- Gisements liés spatialement à une discordance protérozoïque : gros tonnages, très fortes teneurs, coûts d'exploitation bas à élevés (*Canada, Australie*)
- Gisements localisés dans les grès : très gros tonnages, faibles teneurs, coûts d'exploitations faibles (*Niger, Kazakhstan, Ouzbekistan*)



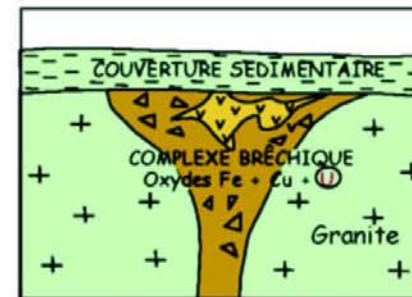
"DISCORDANCE"

Exemple : Saskatchewan, T.N. Australien



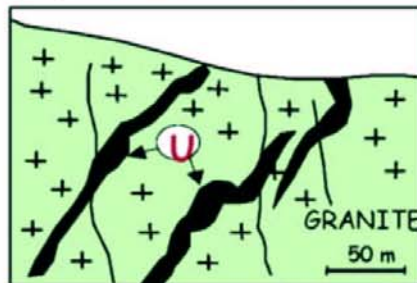
"ROLL"

Exemple : Wyoming, Kazakhstan



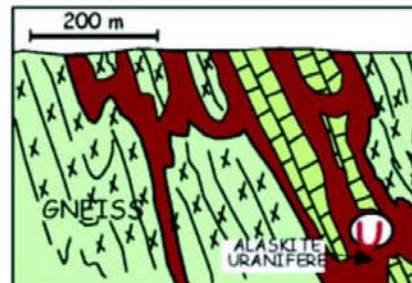
"OLYMPIC DAM"

Exemple : Olympic Dam



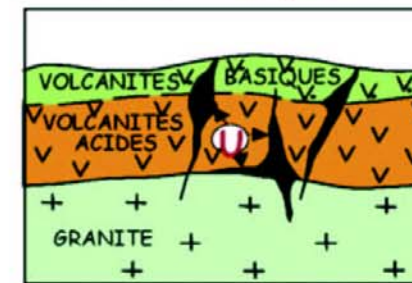
"FILONIEN LENTICULAIRE"

Exemple : Limousin, Erzgebirge...



"DISSEMINÉ"

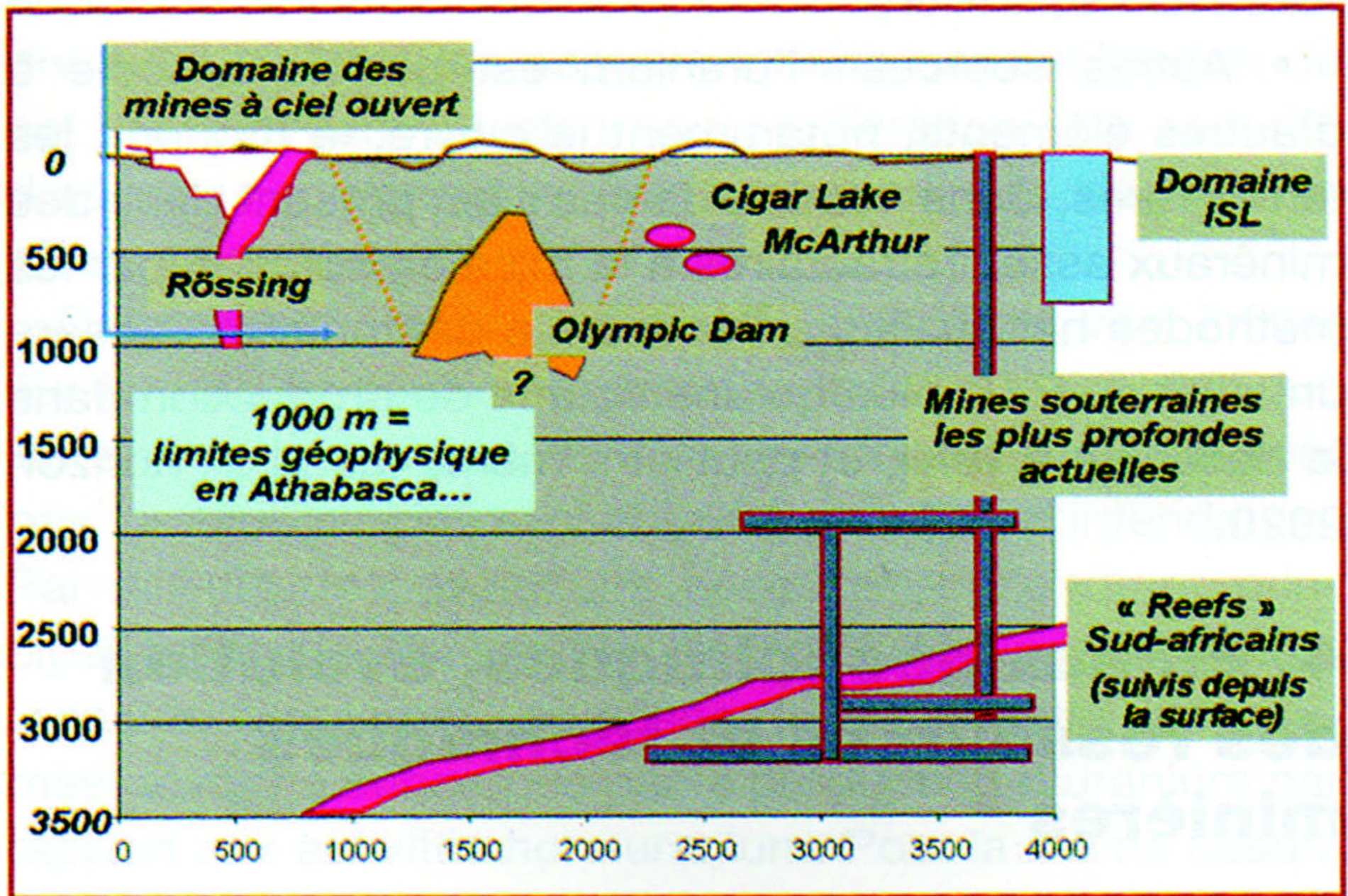
Exemple : Rössing



"VOLCANOGENIQUE"

Exemple : Streltsovska

Profondeur



Ciel ouvert

Carrière de Key Lake



Cigar Lake

Gisement de Cigar Lake

140 000t @ 13,6% U

Bassin ATHABASCA



Arlit



Yellow cake (80 % d'uraninite)

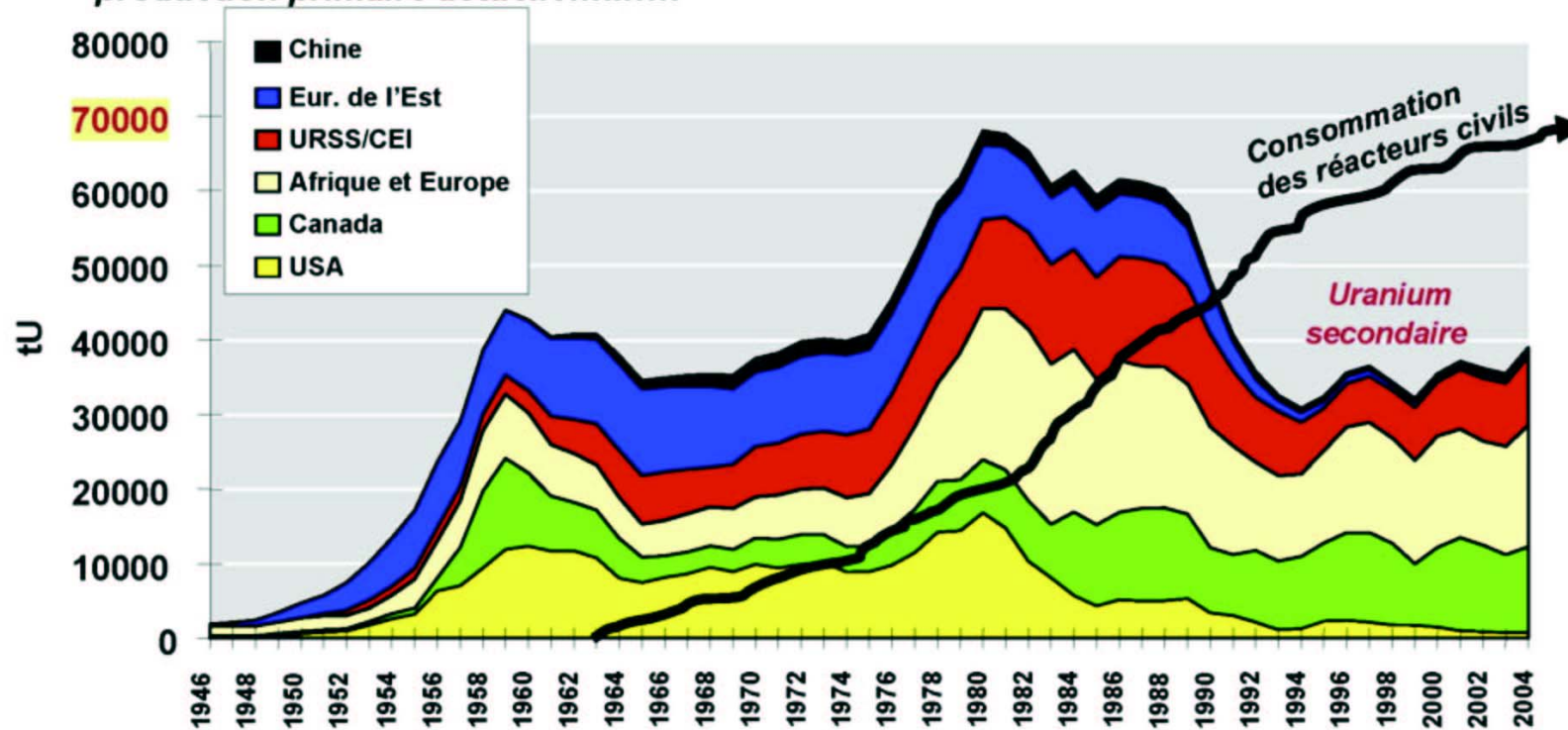


Productions passées



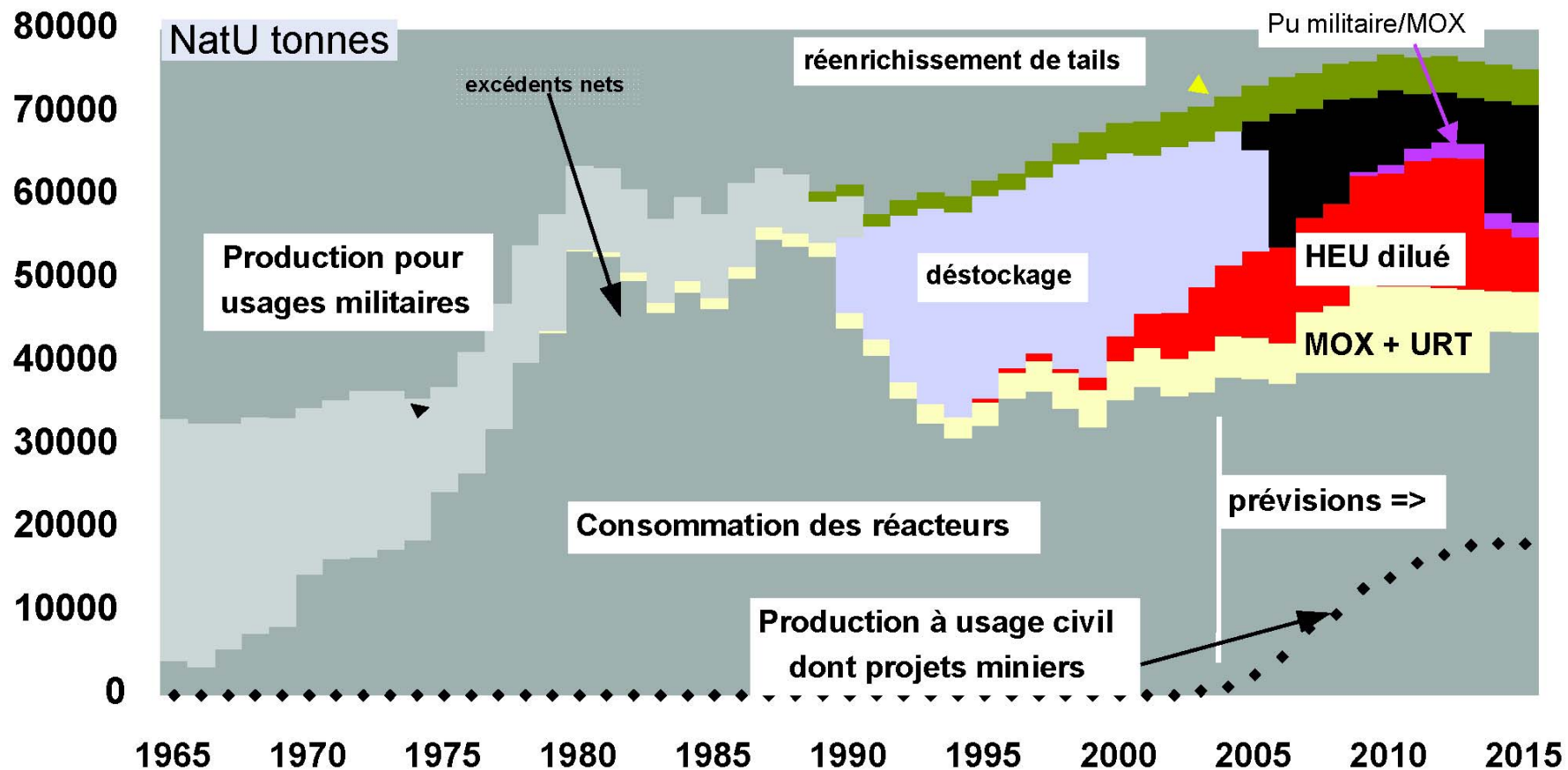
L'uranium: une ressource énergétique « jeune »

- ▶ Depuis 1990 la production minière est nettement inférieure à la consommation. Déficit comblé par le MOX et par le « HEU » jusqu'en 2013, → Production de nouvelles mines.
- ▶ Incertitude sur les niveaux de stocks....
- ▶ Si la consommation atteint environ 100.000t/an en 2030, il faudra en gros doubler la production primaire actuelle.....!!!!



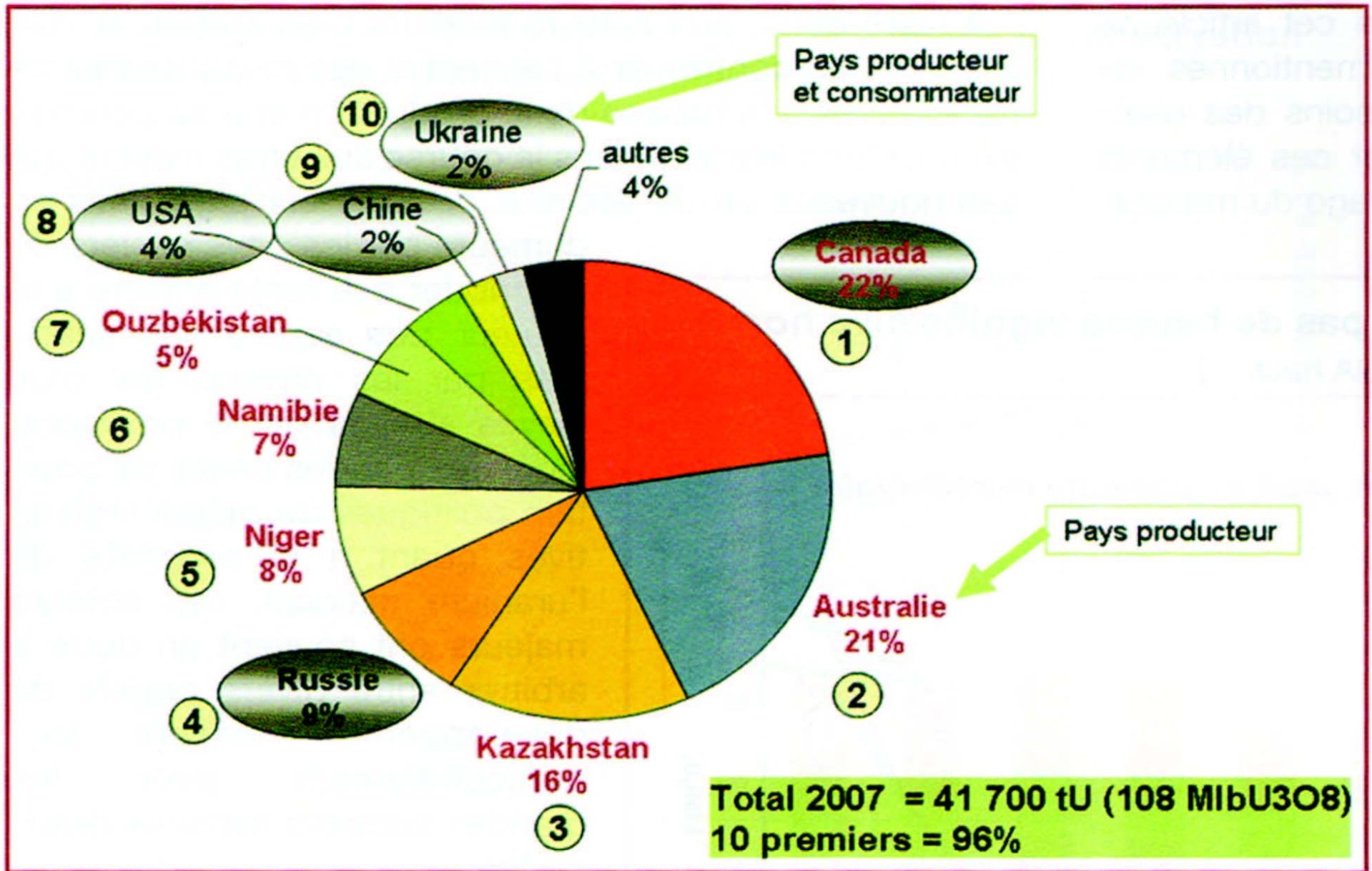
Source: AIEA & AREVA

Sources complémentaires



* Consommation des réacteurs en Unat. (val. DM-06-03) ; objectif conservation de 0,75 année de besoins en stock.

Pays producteurs

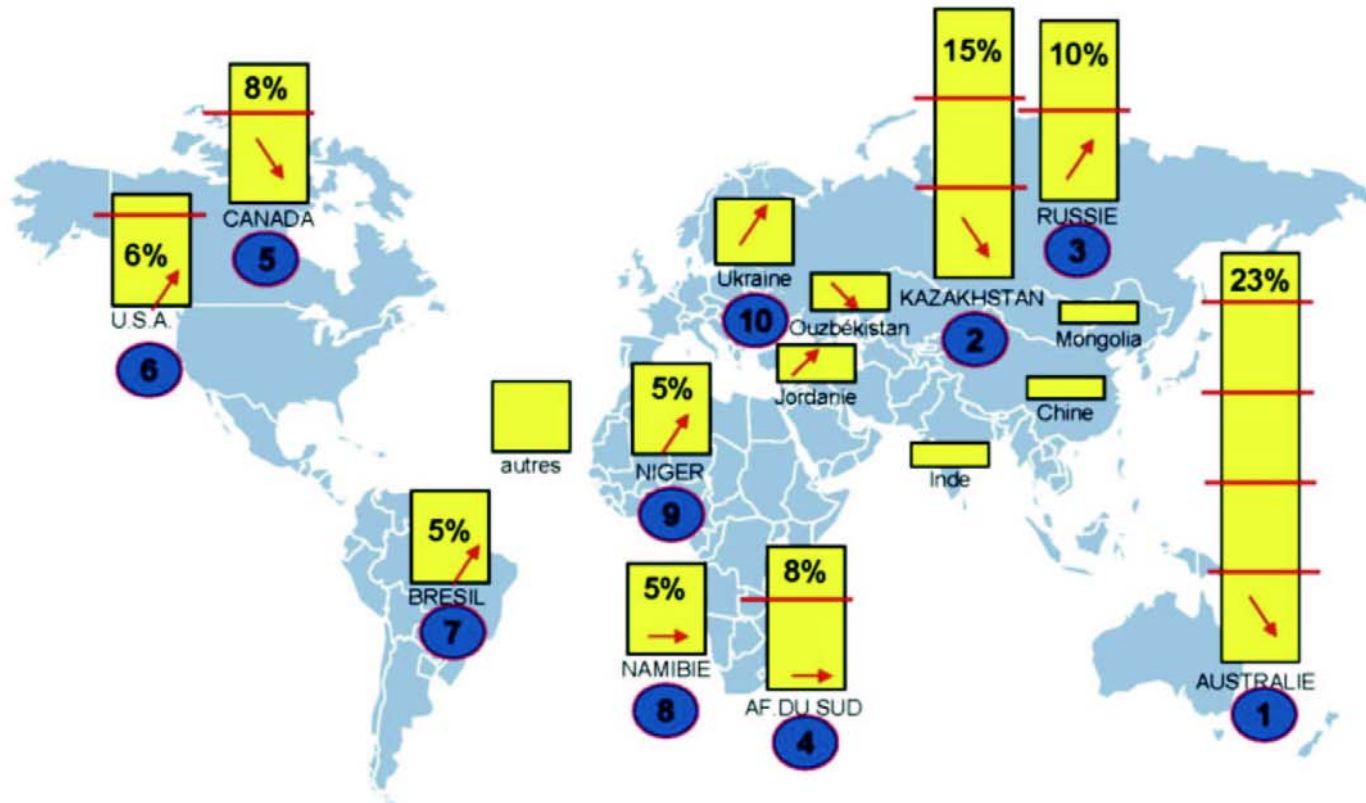


Répartition géographique



Répartition géographique des ressources d'Uranium

► 10 premiers pays (88%) + 5 suivants (96%)

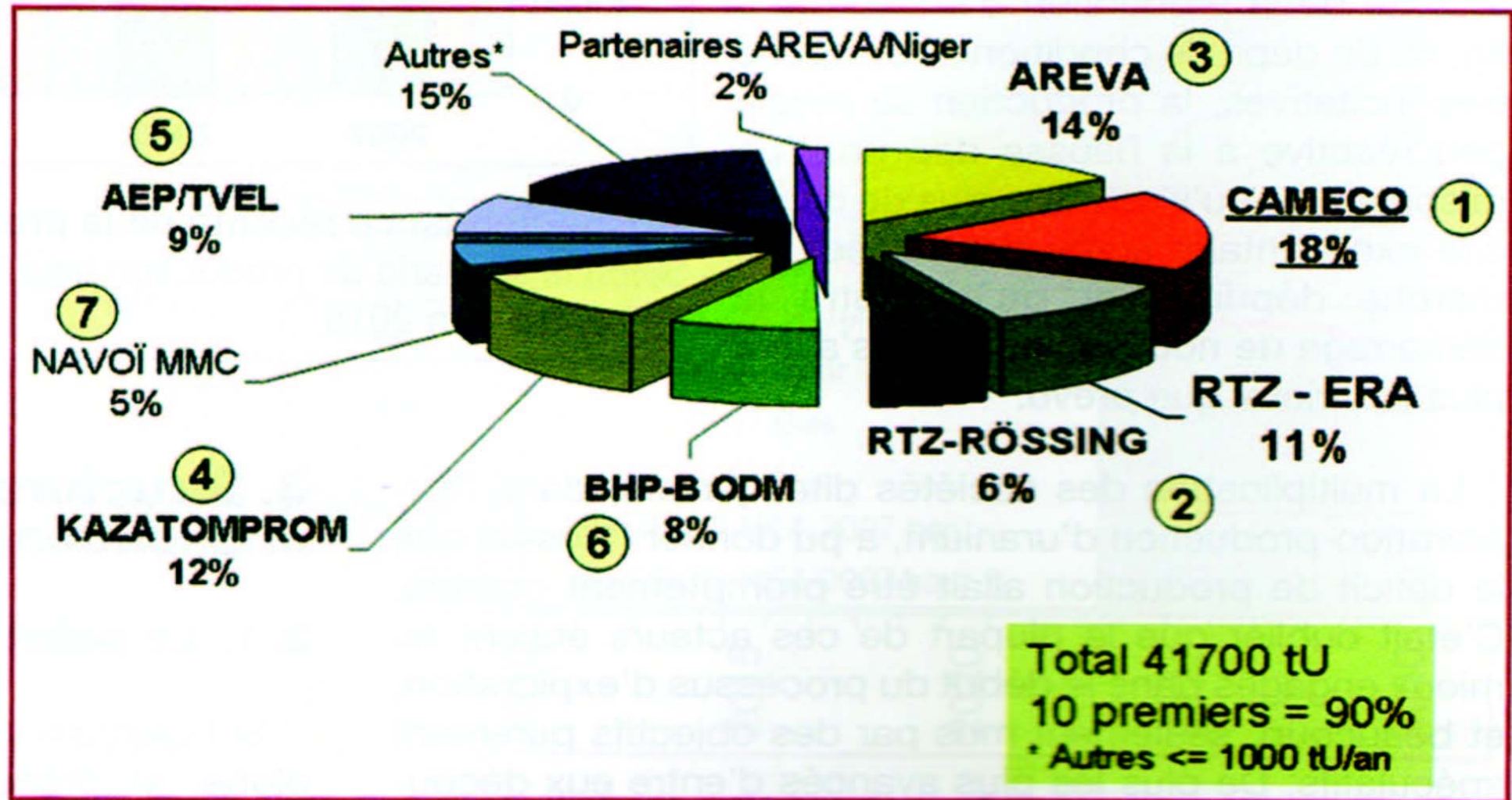


• Ressources récupérables >130\$/kgU ou 50 \$/lbU3O8 - Total non pondéré de 5.47 MtU au 1/01/07

• ↑ ou ↓ : Evolution par pays du pourcentage par rapport à l'évaluation de 2005

Source OCDE-AEN -AIEA « Red Book »

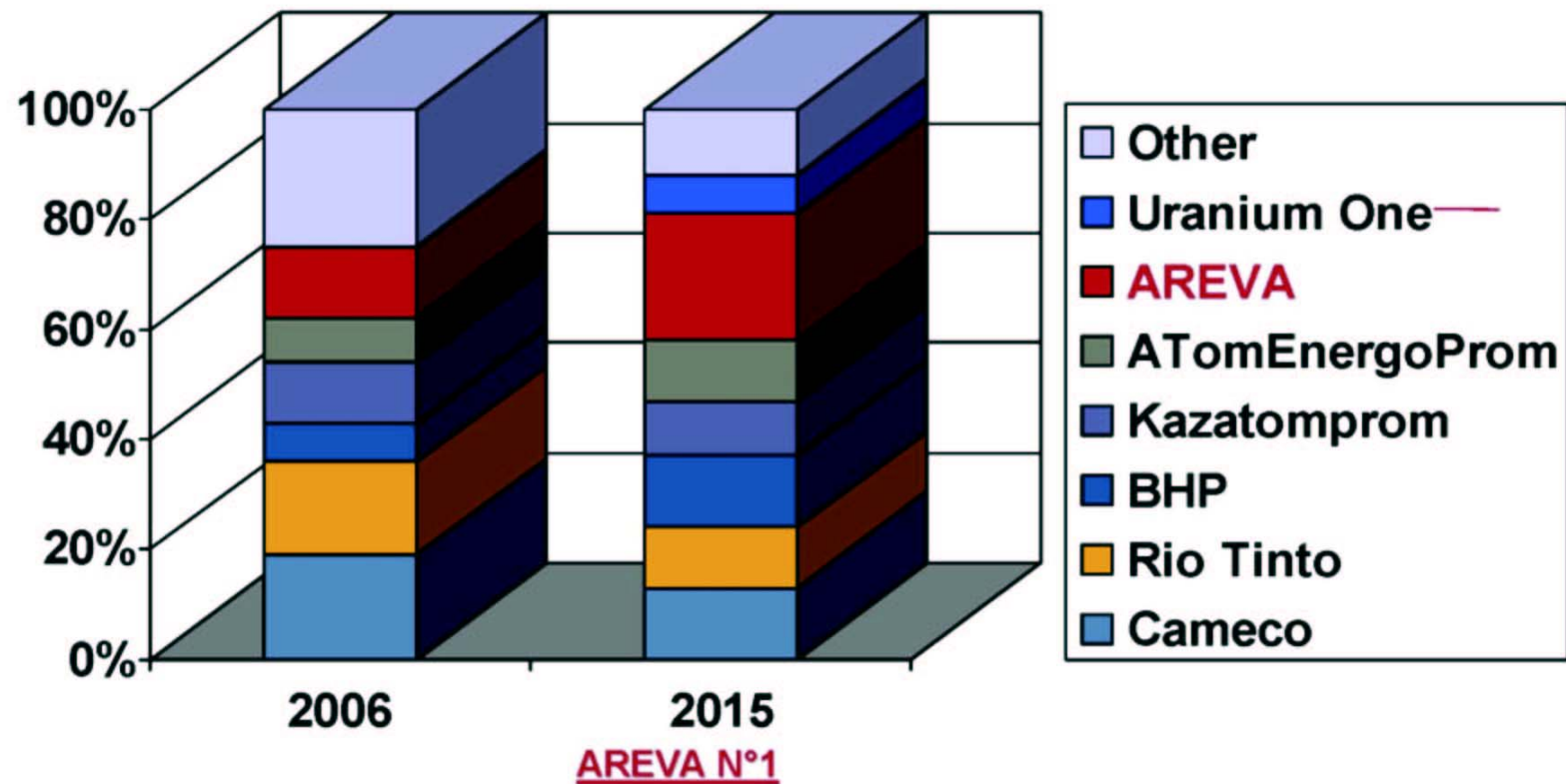
Producteurs



AREVA premier?

 *En 2015, AREVA pourrait être le premier producteur mondial*

Contribution des principaux producteurs à la production mondiale

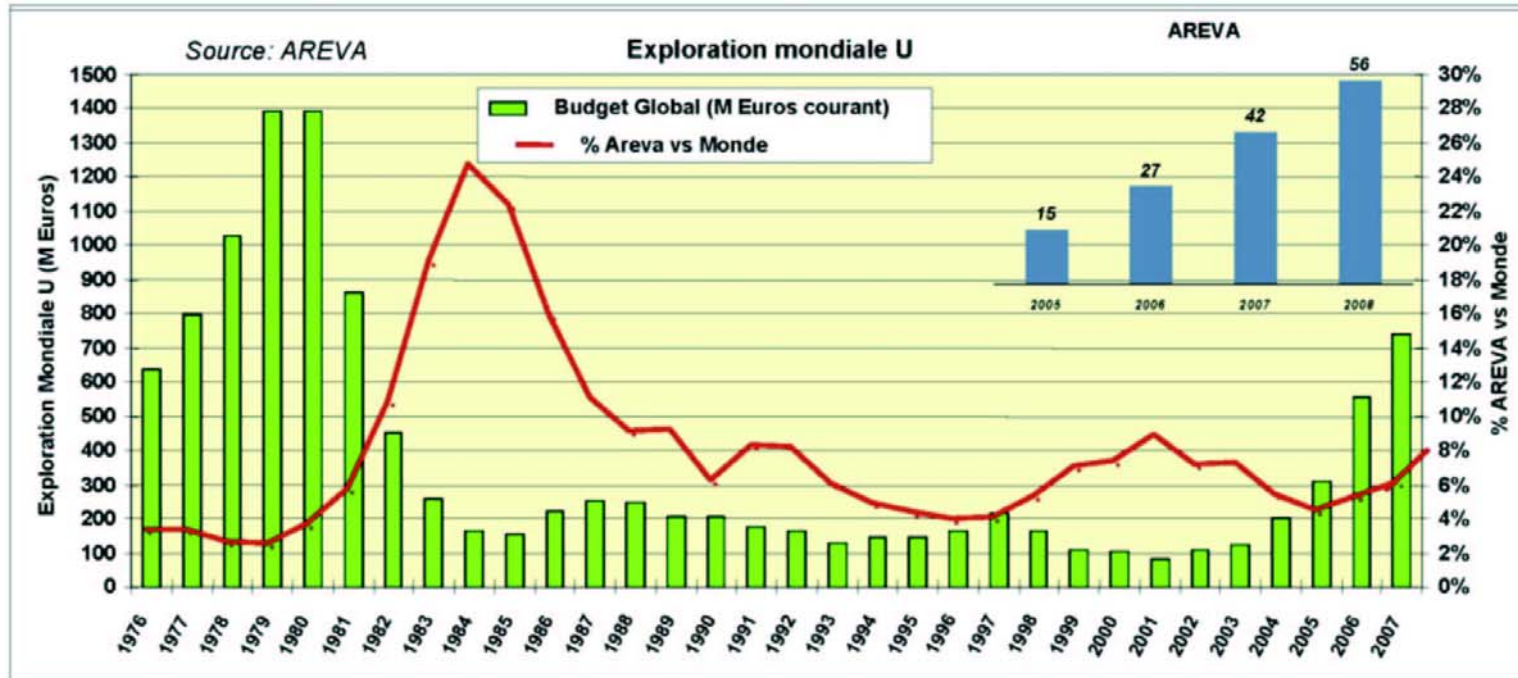


Exploration



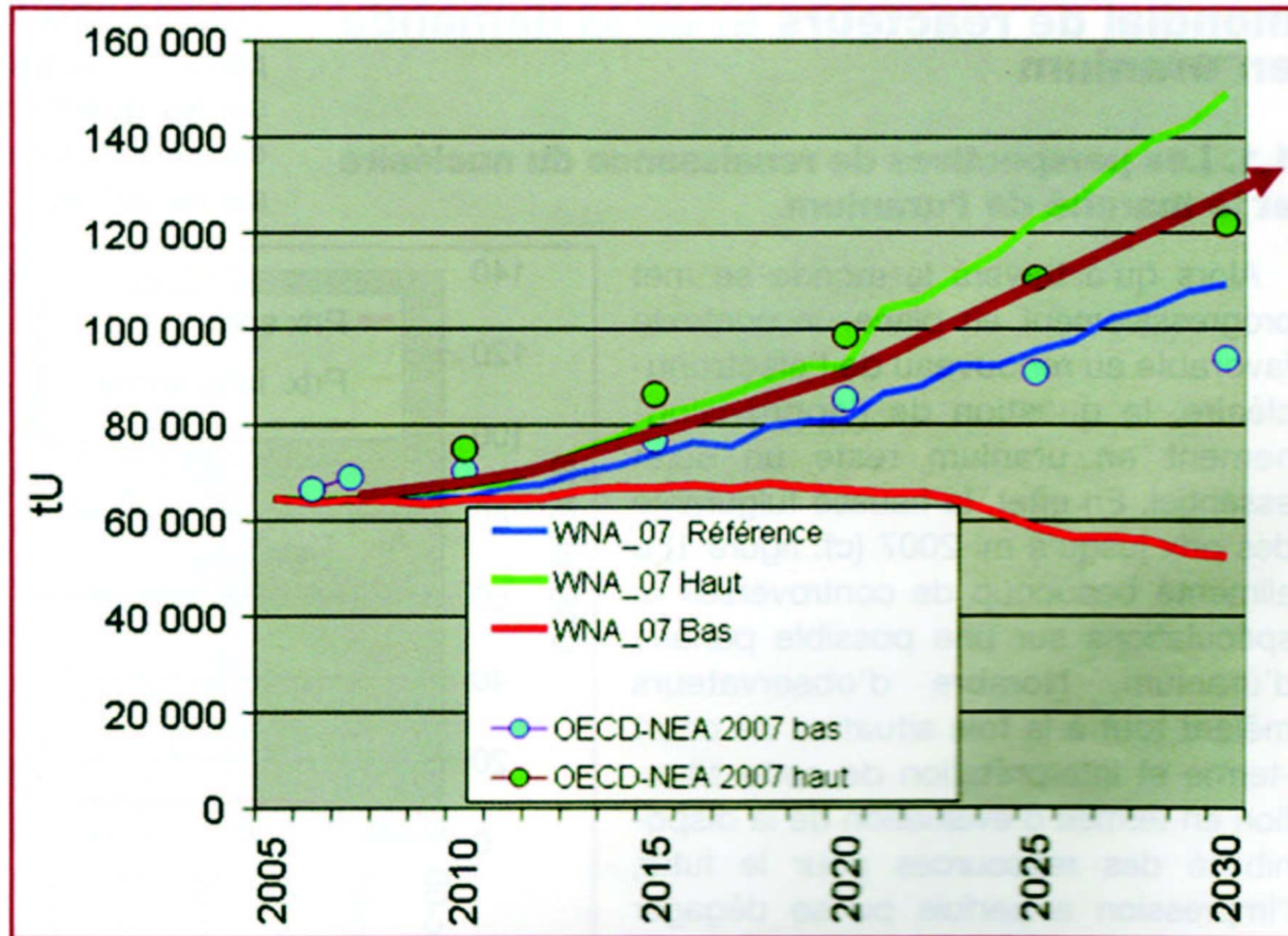
Mais aussi.....

► Des dépenses d'exploration en forte augmentation



- Du temps...En cas de succès en exploration, il y a en moyenne un intervalle de 17 ans entre la prise de permis d'exploration et la mise en production (AIEA, Livre Rouge 2008)
- Des améliorations de traitements pour les basses teneurs, les phosphates, les minerais réfractaires, les shistes, etc....

Evolution des besoins

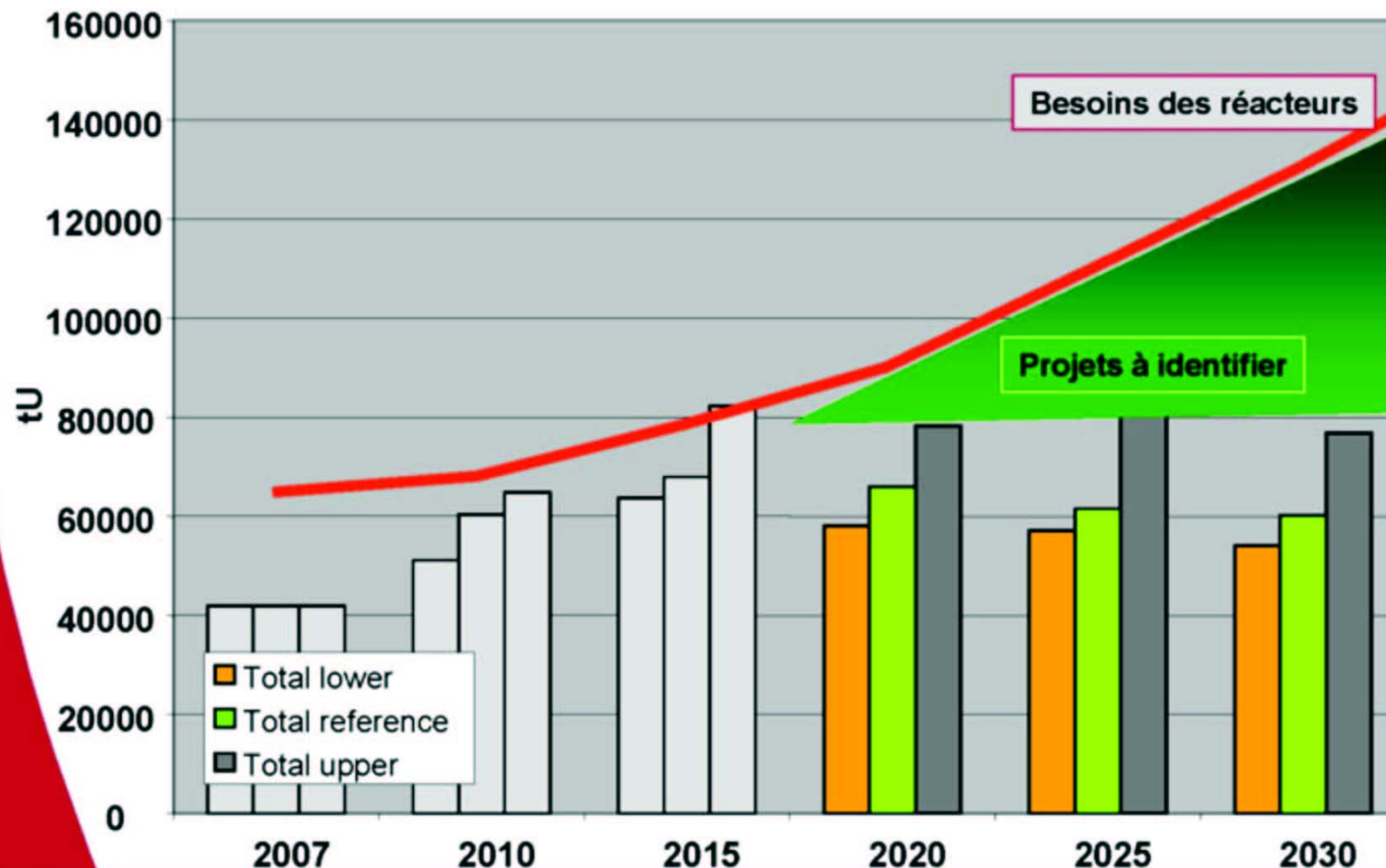


Perspectives Long Terme



Perspectives de production à LT

- Dans les scénarios WNA, les projets de long terme restent à identifier: les ressources existent, mais il reste du travail et des investissements avant de mentionner des projets

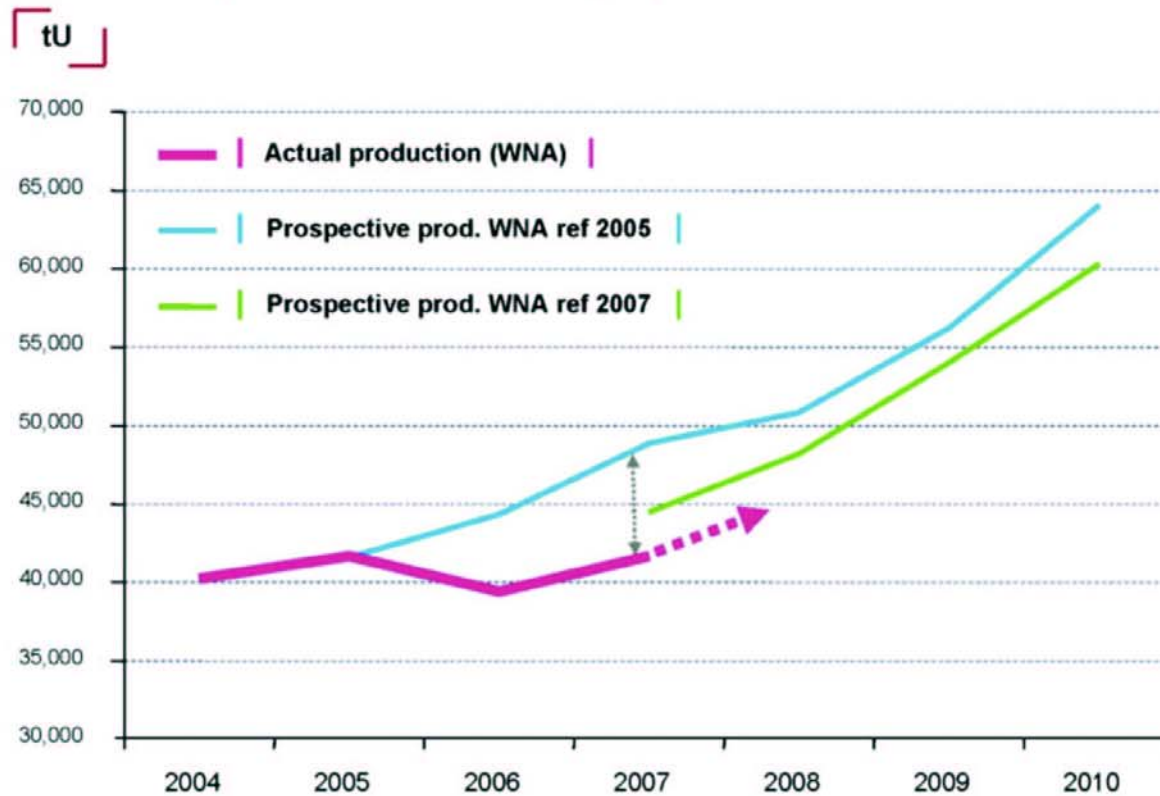


Prévisions court terme



Prévision de production court terme et....la réalité

- ▶ **Même pour le court terme, les prévisions d'augmentation de nouvelles productions sont trop optimistes .**



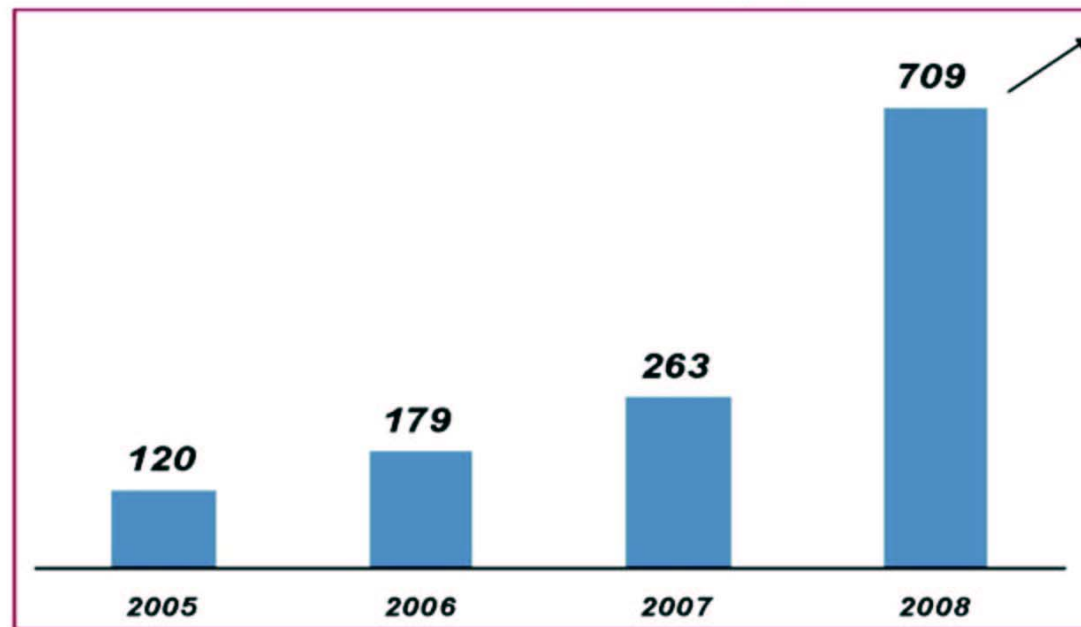
Investissements AREVA



L'Augmentation de production nécessitera:

- ♦ *Des investissements industriels énormes à l'échelle de l'industrie minière de l'Uranium*
 - *AREVA ~ 4 G Euros d'ici 2012... (1.2 G Euros pour Imouraren seul)*
 - *BHP extension Olympic Dam ~ 15 G AUS\$*
 - *Coût d'une nouvelle usine de traitement de grande taille entre 1.5 et 2.5 G\$...*
 - *Avantage clair aux producteurs actuels.....*

AREVA Investissement industriel (M€)



Ressources mondiales

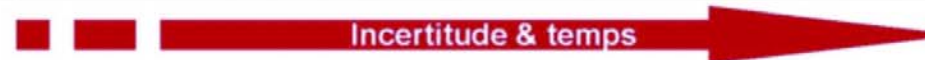


Ressources Mondiales d'Uranium

► Source: « Red Book » OECD-NEA-IAEA; version 2008 (data 2007)



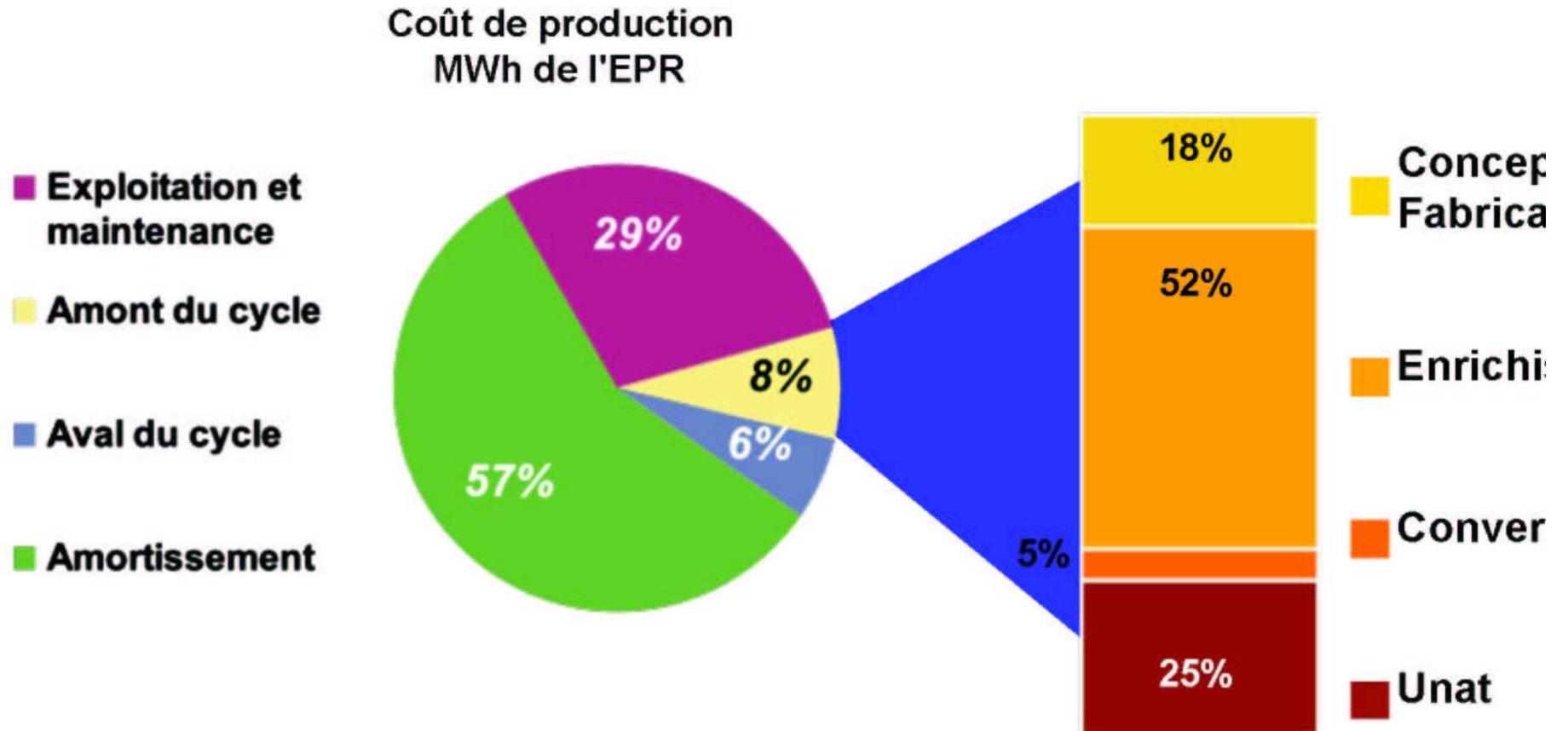
MtU	Conventional Resources				Un Conventional.
	identified		Undiscovered		
US\$/kg U \$/lbU308	RAR	Inferred	Prognosticated	Speculative	
< 40 <15	1,8	1,2	2,0	4,8	about 7 à 22 (cost limits unknown)
40 – 80 15 - 30	0,8	0,6			
80 – 130 30-50	0,7	0,3	0,8		
> 130 > 50	?	?	?	3,0	
	3,34	2,13	2,8	7,8	
TOTAL	5,5		10,5		7 – 22



AREVA : 400 kt U pondérées ~ 12 à15% RAR

* Ressources au 1/01/2007

Coûts amont



Final

Conclusions

- Réserves et ressources : au moins pour 50 ans
- Doubler la production d'ici 2030 : défi !
- Retards vraisemblables (prix)
- Pays producteurs : peu de changements
- Augmentation des coûts de production
- Prix de vente vont croître
- à long terme : surgénérateurs