UE Géoressources — Partie 3 - R. Thiéry - 2026

Uranium et énergie nucléaire

Résumé

Cette partie relie les principes de la radioactivité et de la fission à la géologie des gisements d'uranium, au cycle du combustible nucléaire et à la gestion des matières et déchets radioactifs.

Mots-clés

uranium • radioactivité • fission • criticité • gisement • enrichissement • combustible nucléaire • déchets

Plan de la partie

CM 5	**Uranium, gisements et cycle du combustible nucléaire** Radioactivité naturelle : désintégrations alpha, bêta et gamma • Isotopes, demi-vie et activité radioactive • Fission, fusion et énergie de liaison nucléaire • Noyaux fissiles, fertiles et production de nouveaux noyaux fissiles • Réaction en chaîne, criticité et principe d'un réacteur nucléaire • Géochimie et minéralogie de l'uranium • Facteurs de concentration de l'uranium dans la croûte terrestre • Principaux types de gisements uranifères • Le gisement d'Oklo et les réacteurs nucléaires naturels • Gisements français : Bretagne, Massif central et Limousin • Prospection, extraction et traitement du minerai d'uranium • Cycle du combustible : conversion, enrichissement et fabrication • Combustible irradié, retraitement et gestion des déchets • Ressources, réserves, production et consommation d'uranium • Repères historiques sur le développement de l'énergie nucléaire	**Lundi 5 octobre** 14h45-16h15 · B008
TD 3	**Uranium : gisement, combustible et bilans nucléaires** Reconstitution de la chronologie de formation d'un gisement uranifère • Étude de cas : gisement de Pen Ar • Calcul de teneur, tonnage et quantité d'uranium contenue • Estimation simplifiée de réserves exploitables • Exercices sur les isotopes, la décroissance radioactive et les demi-vies • Bilans de matière lors de l'enrichissement de l'uranium • Ordres de grandeur de consommation d'uranium d'une centrale • Puissance électrique, énergie produite et facteur de charge d'un réacteur • Gestion des déchets : activité, durée de vie et confinement • QCM de synthèse sur le cycle du combustible	**Jeudi 8 octobre** 9h30-11h00 · B104

Fig. 1

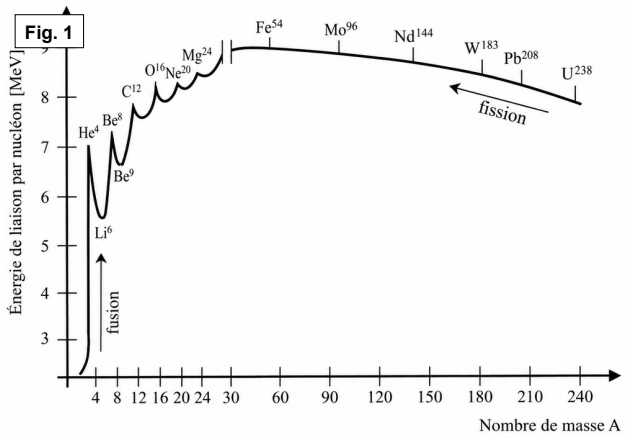


Fig. 2.4 Energies de liaison par nucléon.

Fig. 2

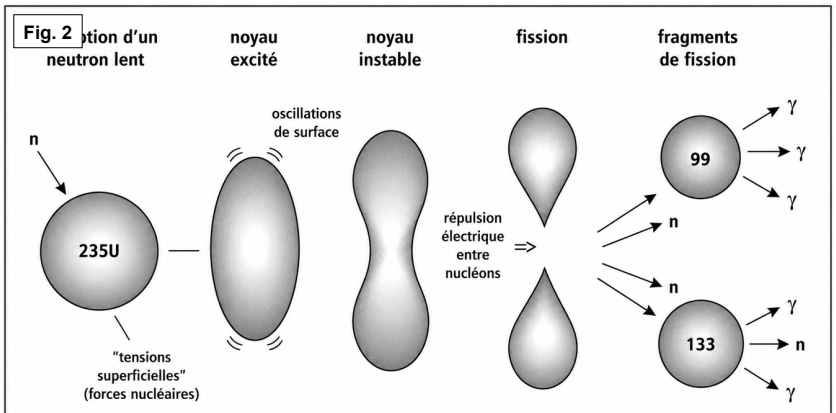


Fig. 4.73 Modèle « de la goutte » pour la fission induite.

Fig. 3

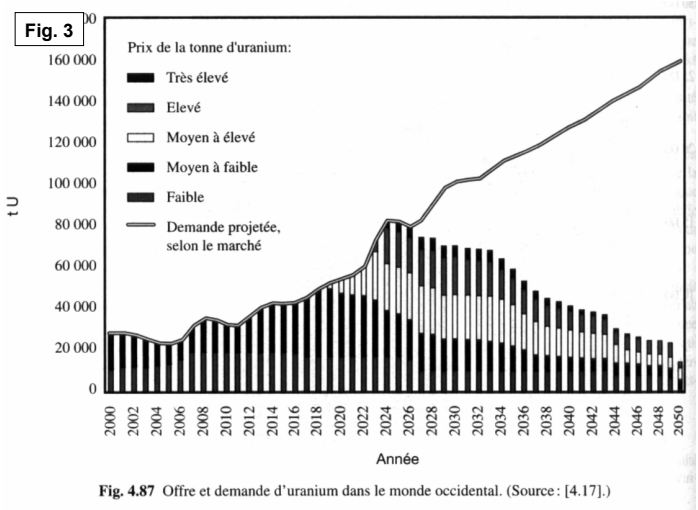


Fig. 4.87 Offre et demande d'uranium dans le monde occidental. (Source : [4.17].)

Fig. 4

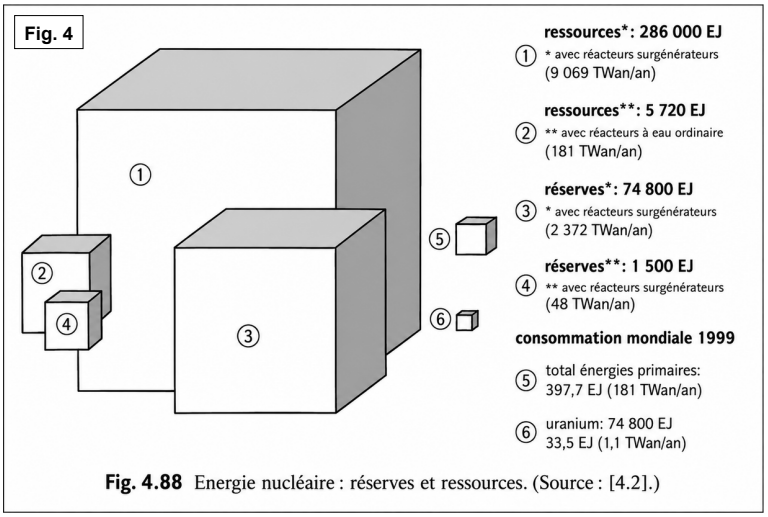


Fig. 4.88 Energie nucléaire : réserves et ressources. (Source : [4.2].)

Fig. 5

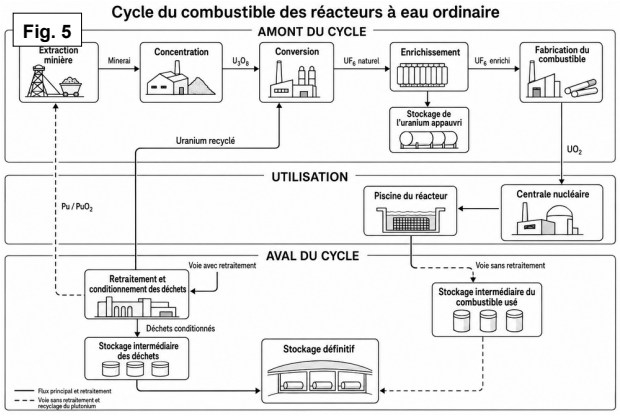


Fig. 6

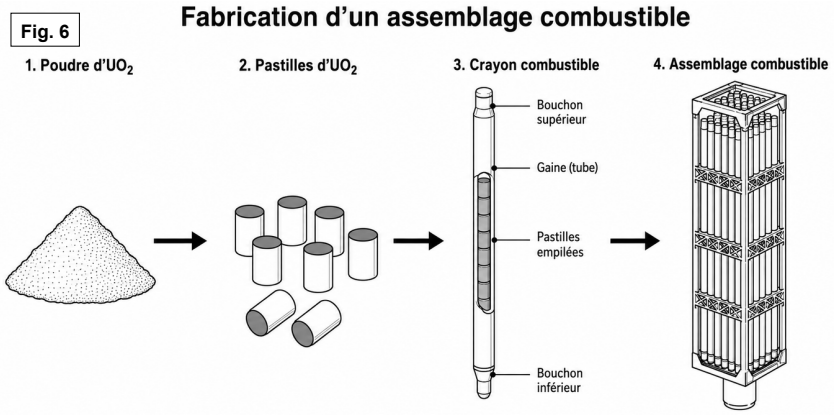


Fig. 7

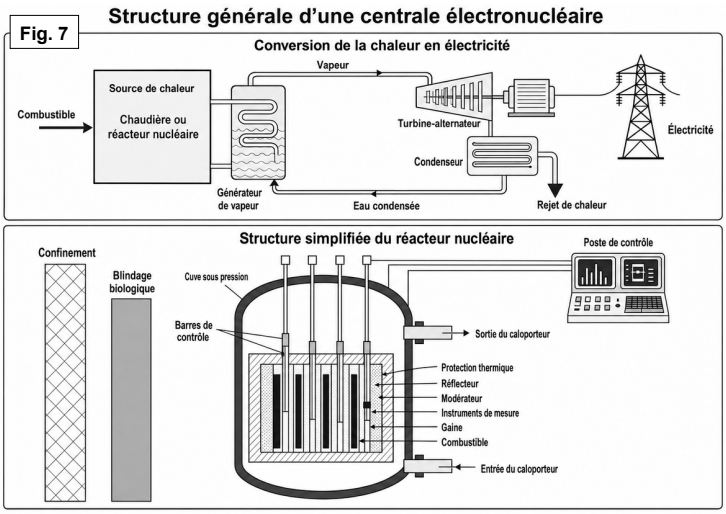
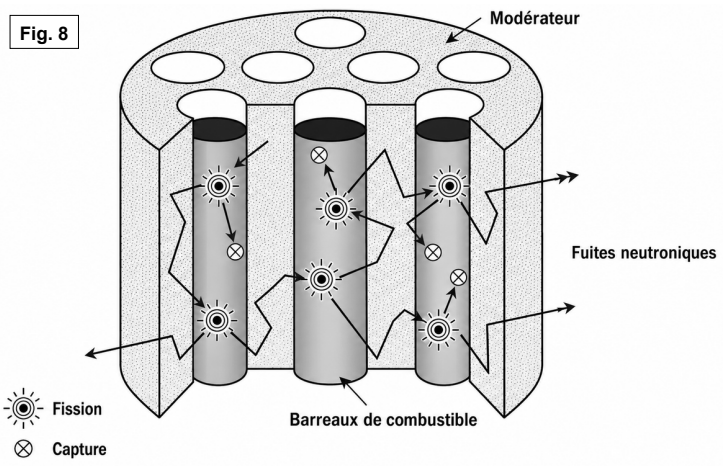
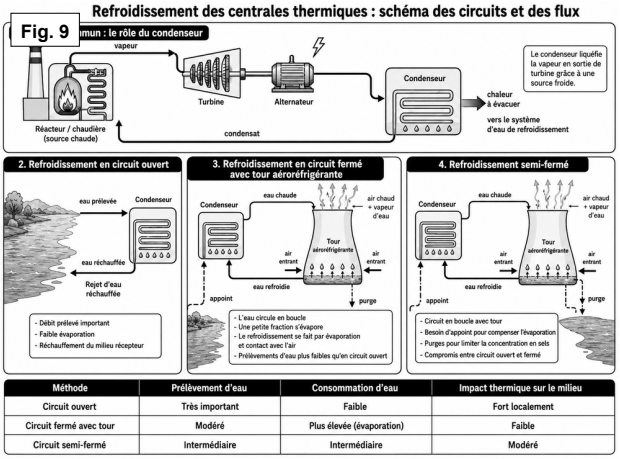


Fig. 8



Disposition hétérogène du combustible et du modérateur dans le cœur d'un réacteur.

Fig. 9



Méthode	Prélèvement d'eau	Consommation d'eau	Impact thermique sur le milieu
Circuit ouvert	Très important	Faible	Fort localement
Circuit fermé avec tour	Modéré	Plus élevée (évaporation)	Faible
Circuit semi-fermé	Intermédiaire	Intermédiaire	Modéré

Fig. 10

Volume et radioactivité des déchets radioactifs

Catégorie de déchets	Volume stocké en France (m^3)	Part de la radioactivité totale
Faiblement radioactifs à courte vie	778 218	0,07 %
Très faiblement radioactifs à courte vie	108 219	0,00 %
Très faiblement radioactifs à vie longue	44 559	0,01 %
Moyennement radioactifs à vie longue	43 359	3,87 %
Hautement radioactifs à vie longue	1 639	96,05 %

Source : Andra.

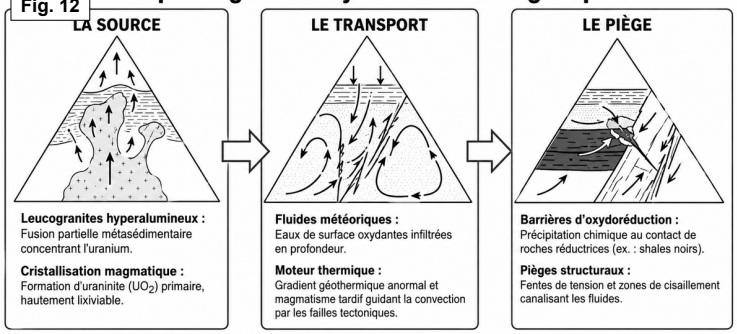
Fig. 11

Tableau 2.26 — Unités utilisées dans le domaine de l'énergie nucléaire

Grandeur	Nom	Symbole	Expression SI
activité	becquerel (SI)	Bq	$1\ s^{-1}$
	curie	Ci	$3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq
dose absorbée	gray (SI)	Gy	$1\ J \cdot kg^{-1}$
	rad	rad	10^{-2} Gy
dose équivalente	sievert	Sv	$Q \cdot 1$ Gy (1)
	rem	rem	$Q \cdot 1$ rad (1)
quantité de rayonnement	röntgen	R	$2{,}58 \cdot 10^{-4}$ C·kg^{-1} d'air (2)
consommation du combustible nucléaire	mégawatt-jour par tonne	MWj/t	$86{,}4 \cdot 10^{3}$ MJ/t

Fig. 12

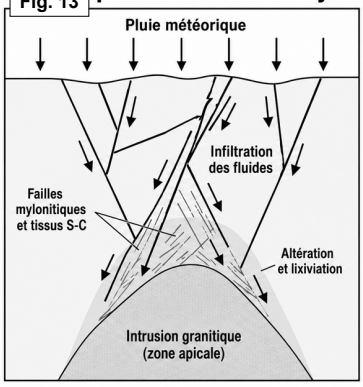
Le paradigme des systèmes métallogéniques



Ce triptyque (**Source–Transport–Piège**) guidera notre déconstruction du système uranifère de Guérande entre 310 et 275 Ma.

Fig. 13

Étape 2 : L'altération hydrothermale (la lixiviation)



L'infiltration météorique

La déformation cisaillante et l'extension tectonique ont créé une perméabilité majeure (fabriques mylonitiques) au sommet de l'intrusion.

Ces discontinuités ont agi comme des drains pour les eaux météoriques oxydantes.

Le marqueur isotopique de l'oxygène ($\delta^{18}O$)

Faciès non déformés : $\delta^{18}O$ de la roche totale = 12,2–13,6 ‰ (signature magmatique normale).

Faciès apical déformé : $\delta^{18}O$ des feldspaths anormalement bas (9,7–11,6 ‰).

Mécanisme : altération sub-solidus en profondeur. Les fluides météoriques oxydants ont altéré les feldspaths et oxydé l'uraninite (U^{4+} insoluble → U^{6+} soluble), emportant l'uranium en solution.

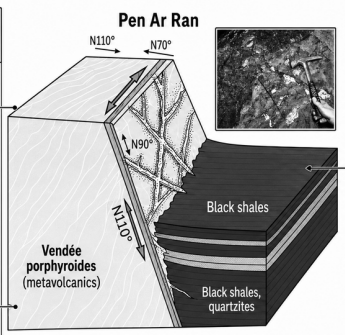
Fig. 14

Étape 3 : Le Piège Structural et Chimique

Le Piège Structural (La Plomberie)

La minéralisation est guidée par une zone de cisaillement senestre sub-verticale orientée N110°.

L'uranium précipite dans des fentes de tension (Riedel) orientées N90° et N70°, créant un réseau perméable focalisant les flux hydrothermaux.



La Barrière d'Oxydoréduction (Le Choc Chimique)

Les fluides uranifères (oxydants, transportant l'U6+ soluble) circulent dans les métavolcanites.

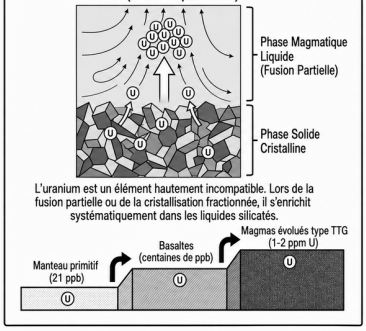
Le blocage : Les filons s'arrêtent abruptement au contact des shales noirs (schistes riches en matière organique).

La réaction : Ce milieu hautement réducteur force la réduction immédiate de l'U6+ en U4+ insoluble, provoquant la cristallisation massive d'oxydes d'uranium (pechblende).

Fig. 15

Les Fondements Géochimiques : Le Moteur du Système Uranifère

Le Comportement Magmatique (L'Incompatibilité)



L'uranium est un élément hautement incompatible. Lors de la fusion partielle ou de la cristallisation fractionnée, il s'enrichit systématiquement dans les liquides silicatés.

Le Comportement Aqueux (La Dualité de Valence)

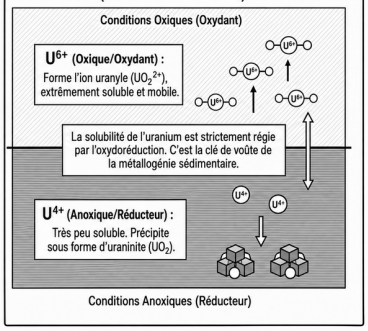


Fig. 16

L'Anatomie d'une Province Uranifère

Définition Systémique

Les gisements majeurs résultent d'une hétérogénéité crustale initiale qui persiste sur de longues périodes géologiques.

Le Mécanisme : Remobilisations successives (orogéniques, métamorphiques, fluides sédimentaires) concentrant l'uranium de plusieurs ordres de grandeur au-dessus du fond géochimique.

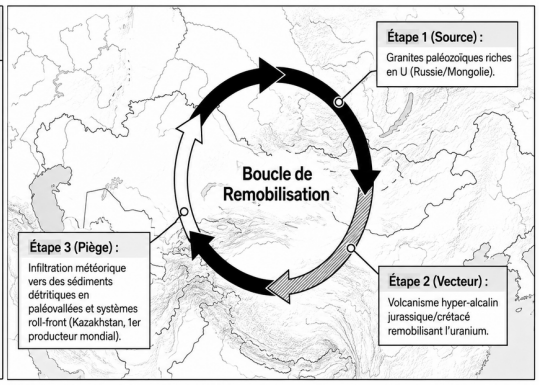


Fig. 17

Matrice Évolutive des Gisements (4.6 Ga - Présent)

Ère Géologique	État de l'Atmosphère	Déclencheur Majeur	Typologie des Gisements
Période 1 (4.6 - 3.2 Ga)	Anoxique	Différenciation crustale	Faibles concentrations magmatiques (TTG)
Période 2 (3.2 - 2.2 Ga)	Anoxique	Début de la subduction	Placers détritiques mécaniques (Conglomérats à galets de quartz)
Période 3 (2.2 - 0.45 Ga)	Oxydante	Great Oxidation Event & Bassins intracontinentaux	Discordances géologiques, Métasomatose sodique, Réacteurs naturels (Oklo)
Période 4 (0.45 - 0 Ga)	Moderne	Apparition des plantes continentales & Courants océaniques	Roll-fronts intraformationnels, Sédiments phosphatés

Fig. 18

Archéen Anoxique : Les Premières Hétérogénéités Magmatiques (4.6 - 3.2 Ga)

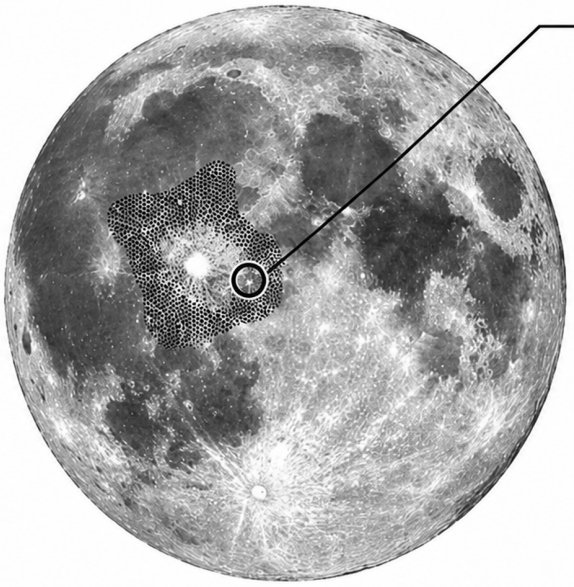
L'État de la Terre

Croûte mafique fine, absence de subduction structurée, atmosphère strictement anoxique.

Premières fusions du manteau : formation des tonalites-trondhjémites-granodiorites (TTG).

Résultat : Gisements magmatiques extrêmement modérés (max 1-2 ppm U). L'uranium est dispersé.

L'Analogie Lunaire



Le Concept : La Lune préserve l'image d'une géochimie pré-tectonique.

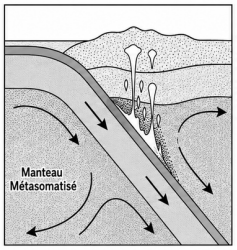
Le Mécanisme : Assimilation magmatique suite à un impact géant créant le KREEP (Potassium, Rare Earth Elements, Phosphore).

Données : Pics jusqu'à 2.2 ppm d'Uranium (et 7.3 ppm de Thorium). 30% de l'uranium lunaire est concentré ici, démontrant l'efficacité de la différenciation magmatique primitive.

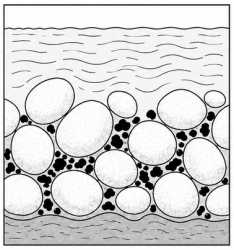
Fig. 19

…e de la Subduction et les Pièges Mécaniques (3.2 - 2.2 Ga)

Source : Le Moteur Tectonique → **Vecteur & Piège : L'Anomalie des Placers**



Début de la subduction. Fusion d'un manteau métasomatisé produisant des magmas potassiques calco-alcalins fortement enrichis.



Transport hydrodynamique sans dissolution chimique.

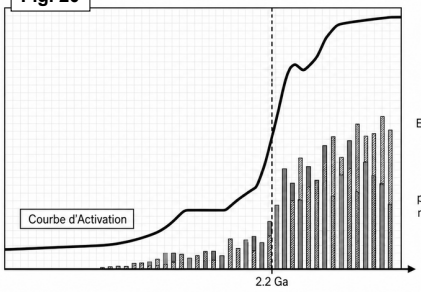
Mécanisme : L'absence d'oxygène permet à l'uraninite (U4+) d'être transportée intacte comme un minéral lourd détritique.

Données clés : Craton du Kaapvaal. Intrusions atteignant jusqu'à 300 ppm d'Uranium (cristallisation d'uraninite primaire).

Gisements types : Conglomérats à galets de quartz du Witwatersrand (Afrique du Sud) et Elliot Lake (Canada).

Fig. 20

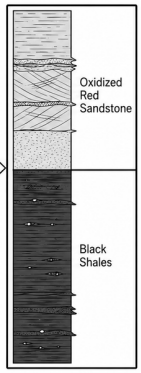
…oint de Bascule : The Great Oxidation Event (2.2 Ga)



L'Événement Shunga

Enfouissement massif de matière organique sur les marges passives épicontinentales.

Rôle : Création d'immenses pré-concentrations d'uranium et mise en place des futurs pièges réducteurs.



Le Changement de Paradigme Chimique.

Prolifération des stromatolites sur les plateformes continentales → Injection massive d'O2.

Conséquence : L'uranium accumulé sous forme d'uraninite est oxydé en U6+ (ion uranyle). Il devient subitement hyper-mobile dans l'hydrosphère.

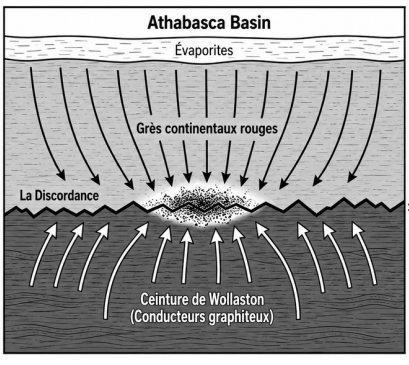
Fig. 21

…écanique des Fluides Diagénétiques : Le Modèle Discordance

L'Architecture du Réacteur (1.7 - 1.5 Ga)

Le Réservoir : 4 à 5 km de grès continentaux rouges hyper-purs, ultra-oxydés.

Le Socle : Black Shales métamorphisés à conducteurs graphiteux.



Le Moteur Chimique

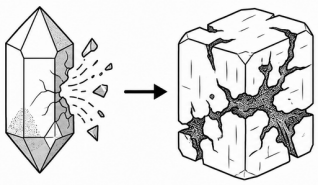
Descente des fluides de bassin : Température de ~120°C, salinité extrême, hyper-oxydés, et pH très acide.

La Précipitation : Lessivage brutal de l'uranium du socle, suivi d'une précipitation violente par interaction avec le méthane à la discordance.

Fig. 22

…ntes du Protérozoïque : Métasomatose et Réacteurs Naturels

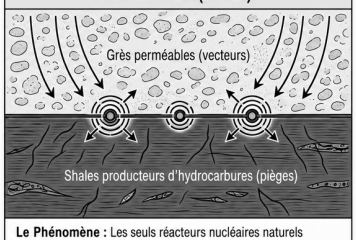
La Métasomatose Sodique (1.8 - 1.5 Ga)



Mécanisme (Ukraine / Brésil) : Processus épisyénitique profond (300-500°C).

Dissolution massive du quartz → Remplacement par l'albite sodique → Dépôt d'uranium secondaire dans les vacuoles créées.

L'Anomalie Oklo (2.0 Ga)



Le Phénomène : Les seuls réacteurs nucléaires naturels connus au monde (Gabon).

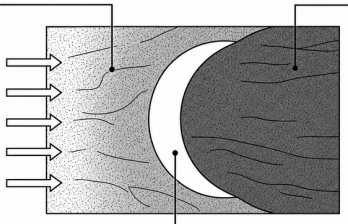
Le Contrôle Tectono-Chimique : Localisés sur une barrière d'oxydoréduction stricte entre des grès perméables (vecteurs) et des shales producteurs d'hydrocarbures (pièges).

Fig. 23

La Révolution Végétale et les Roll-Fronts (0.45 Ga - Présent)

L'Impact du Silurien

L'apparition des plantes continentales permet la formation de sédiments détritiques poreux truffés de matière organique réduite. Un nouveau type de piège est né.



Variante Tectono-Lithologique : Lodève

Dépôt stratiforme primaire dans sédiments organiques, suivi d'une remobilisation tardive par fluides de bassin dans les fractures tectoniques.

La Diagenèse Bactérienne (Modèle Kazakhstan)

La matière organique sert de substrat aux bactéries sulfato-réductrices. Elles génèrent des sulfures (pyrite framboïdale) qui réduisent brutalement l'uranium en solution météorique.

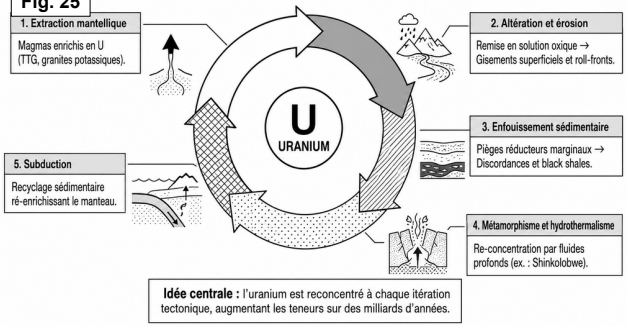
Fig. 24

La Super-Province Phosphatée (Crétacé - Éocène)

La Conjonction Paléoclimatique (90 - 45 Ma)	L'Impact Ressources
• **Géographie :** Océan Téthys circum-équatorial ouvert sur l'Atlantique.	• Explosion de la productivité biogénique générant des gisements de phosphates géants.
• **Climat :** Réchauffement global et élévation majeure du niveau marin.	• **L'Enjeu Marocain :** Le Maroc abrite ~7 millions de tonnes d'uranium (50-150 ppm), actuellement fractionné dans l'acide phosphorique lors de la production d'engrais.
• **Océanographie (Effet Ekman) :** Vents d'est repoussant les eaux de surface, provoquant un upwelling massif d'eaux froides et nutritives sur les plateformes carbonatées.	

Fig. 25

Le cycle géochimique global de l'uranium



Idée centrale : l'uranium est reconcentré à chaque itération tectonique, augmentant les teneurs sur des milliards d'années.

Fig. 26

L'inventaire des ressources mondiales (Livre rouge AIEA 2023)

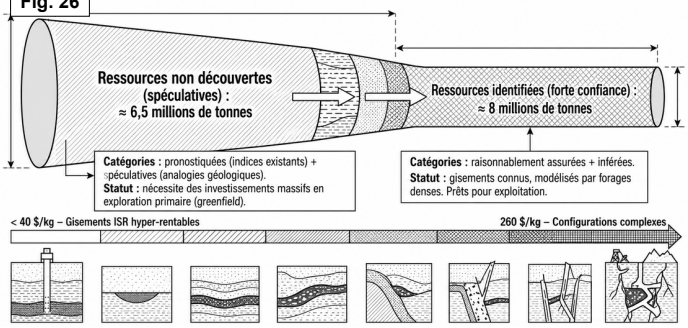


Fig. 27

Production vs. demande : l'écart stratégique

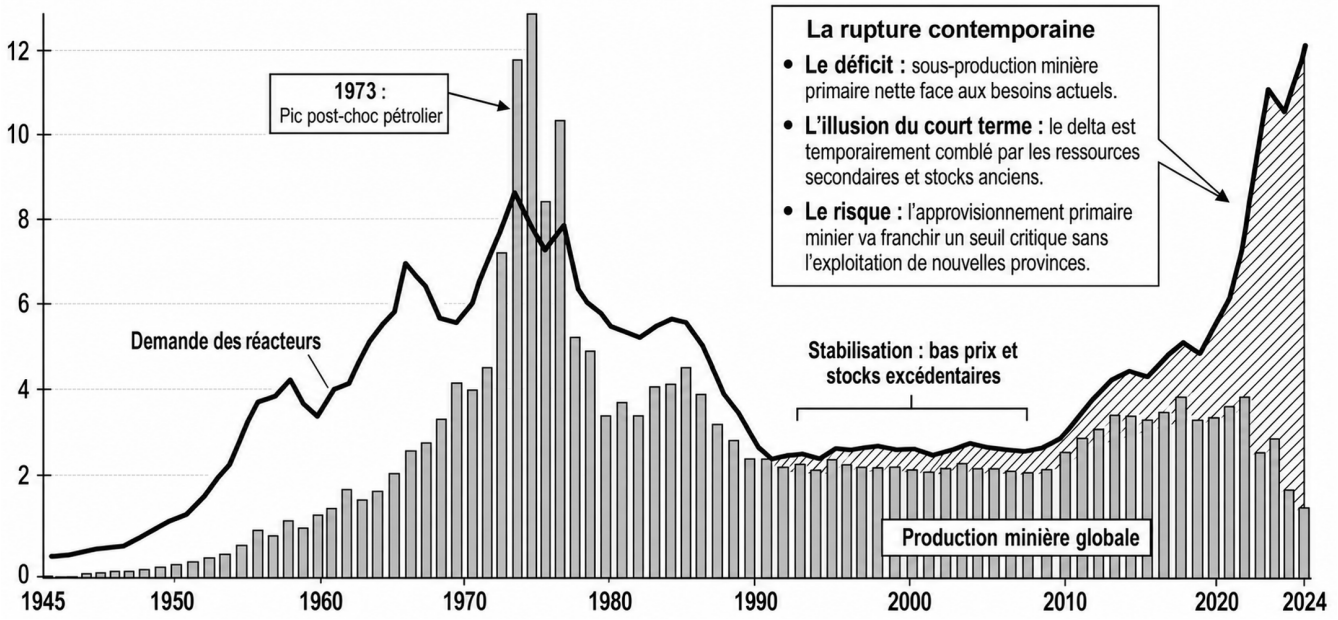


Fig. 28

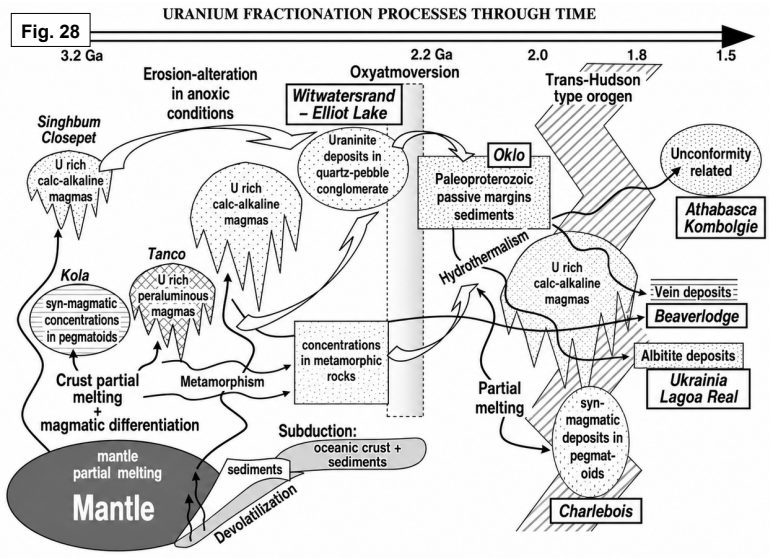


FIG. 2. Evolution of uranium fractionation mechanisms and the genesis of the different uranium deposit types from Mesoarchean to Mesoproterozoic. The fractionation mechanism is in bold, the major occurrences of the different types of ore deposits formed during this period of time are in italics and framed in red.

Fig. 29

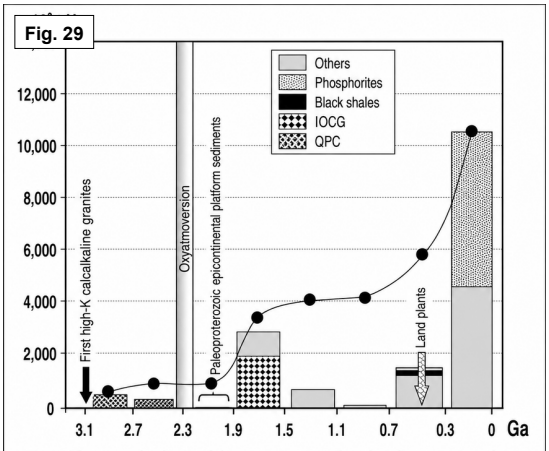


Fig. 1. The uneven distribution of the uranium resources through geologic time. Some deposits types with large resources have been distinguished (QPC = quartz pebble conglomerates; IOCG = iron oxide-copper-gold, mainly represented by Olympic Dam; black shales, mainly represented by the alum shales of Sweden; sandstone = regroup all hydrothermal diagenetic deposits with intrafromational redox control and surficial deposits such as calcretes and lignite, which represent nearly 500 deposits; phosphorites and other types. Source of the data: International Atomic Energy Agency redbooks and database, including more than 1,200 deposits. The cumulative present-day age distribution curve of uranium resources is represented. The curve does not take into account the uranium resource from phosphate deposits for the 0.3 to 0 Ga period.

Fig. 30

Réalités de l'Exploitation Moderne : Ingénierie et Sécurité

L'image de la mine d'uranium reste figée sur les erreurs des années 1950. La réalité extractive contemporaine repose sur le zéro contact et la robotique.

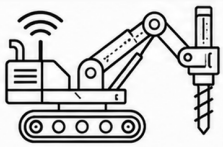
Perceptions historiques (années 50/60)



- Exposition directe au front de taille.
- Excavation à ciel ouvert massive et galeries non-automatisées.
- Méconnaissance des normes de radioprotection.

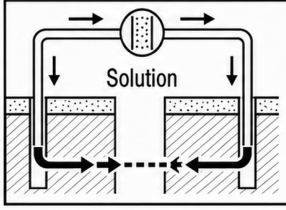
Standards technologiques actuels

Cas 1 : L'hyper-richesse (Cigar Lake, Canada)



Minerai à 20 % U. Congélation du sol et abattage minier 100 % télécommandé. Zéro humain en contact avec le minerai.

Cas 2 : récupération in situ / lixiviation (Kazakhstan)



Injection de solutions et pompage en circuit fermé. Aucune excavation, aucun contact radiologique, restauration rapide du site.

Fig. 31

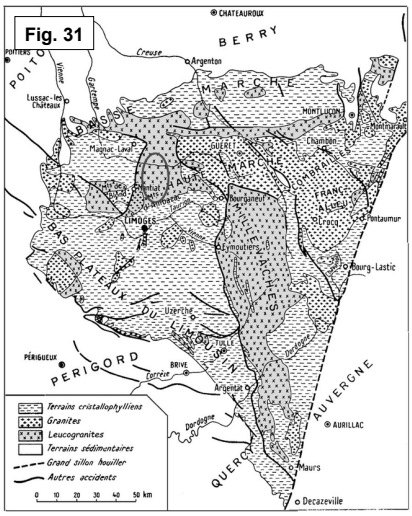


Fig. 32

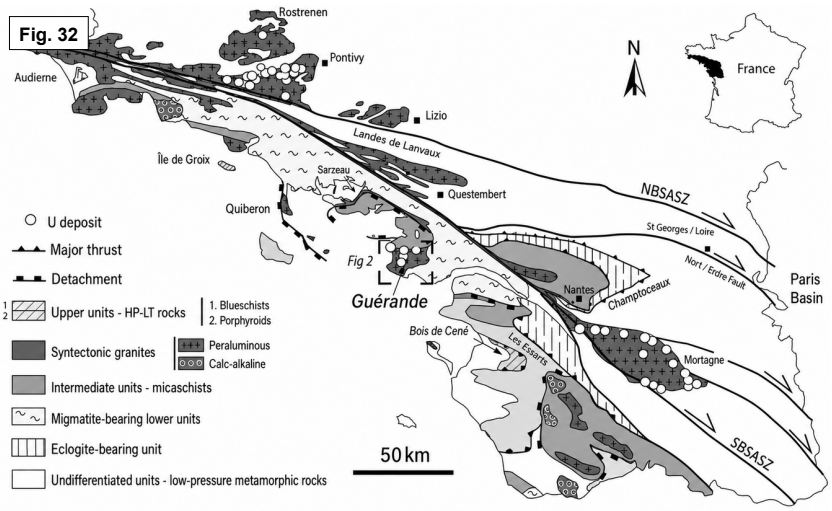


Fig. 33

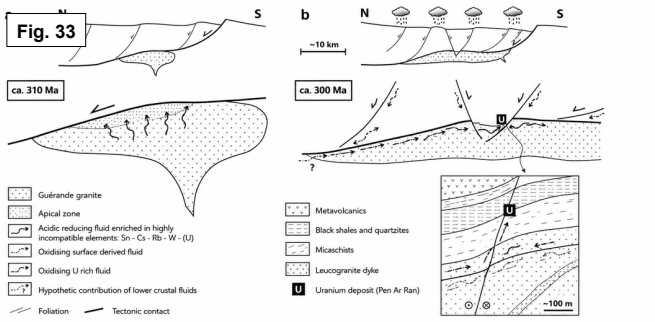


Fig. 15. Drawing representing the uranium behavior evolution in the Guérande granite from ca. 310 to ca. 300 Ma. (a) At ca. 310 Ma, the Guérande leucogranite emplaces and differentiates in an extensional deformation zone. The most evolved U-rich magmas migrate toward the apical zone of the intrusion. U enrichment at the apical zone is enhanced by the interaction with orthomagmatic fluids that trigger the crystallization of "magmatic" uranium oxides. (b) At ca. 300 Ma, the regional deformation is still active. Oxidizing fluids derived from the surface circulate in the deformed facies of the apical zone of the Guérande leucogranite and become enriched in U due to leaching of magmatic uranium oxides. The heat provided by a late magmatic event, as expressed by the emplacement of late leucogranite dykes, likely contributes to maintain the convective fluid circulations. U-rich fluids migrate toward the faults and precipitate U at the contact with reducing environments, such as the black shales. Such a hydrothermal system was likely active until ca. 275 Ma.

Fig. 34

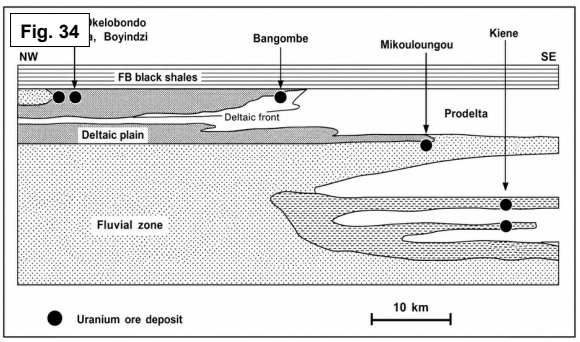


FIG. 3. Paleogeographic reconstruction of the FA formation in the Franceville basin and location of the uranium ore deposits.

Fig. 35

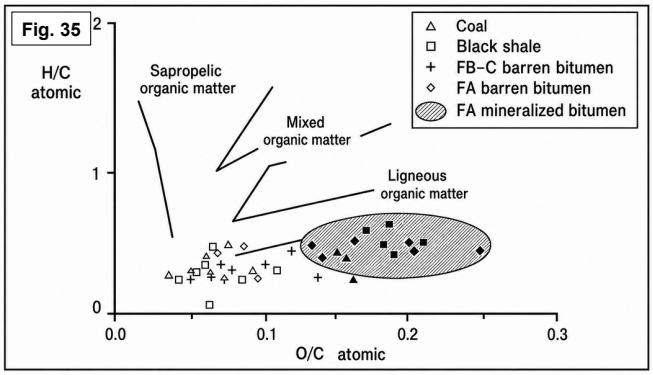


FIG. 11. H/C and O/C diagram of the extracted organic matter from sediments of the Franceville basin.

Fig. 36

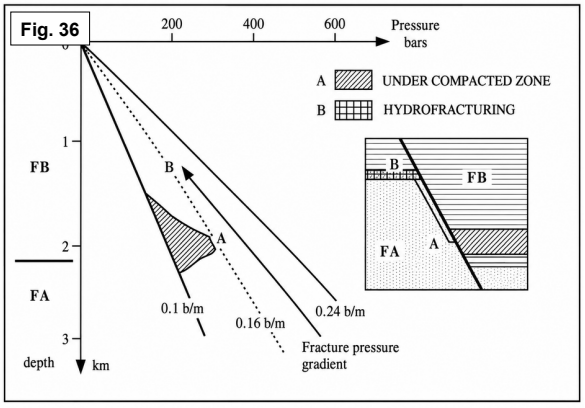


FIG. 20. Pressure gradient in the Franceville basin: hydro-fracturing conditions.