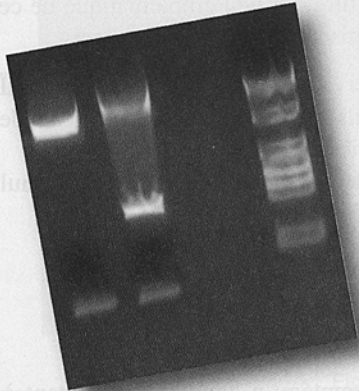


## Génome des plantes cultivées et biodiversité



Le kit correspond à la phase expérimentale d'un TP, à placer dans un raisonnement scientifique à propos d'une partie du nouveau programme spécifique de SVT de terminale S : « Il s'agit de montrer que l'Homme agit sur le génome des plantes cultivées et donc intervient sur la biodiversité végétale ».

Le kit permet de mettre en évidence une différence génétique, par une électrophorèse sur 2 fragments d'ADN de vigne, amplifiés par PCR, l'un provenant d'une plante sensible à la maladie et l'autre d'une

plante résistante.

Les deux ADN sont prêts à être déposés sur gel pour être comparés par électrophorèse. Les réactifs du kit pédagogique ne présentent pas de caractère dangereux, toxique ou pathogène. Le kit permet de faire 20 tests(\*) ou 80 avec le FlashGel Système.

Attention : les gels d'agarose et le colorant pour ADN, nécessaires à l'électrophorèse (sauf pour le système FlashGel), ne sont pas fournis.

Prévoir 3 à 4 semaines entre la réception de la commande et la livraison.

Une notice technique complète est fournie avec les données scientifiques précises.

(\*) : 1 test correspond à 1 dépôt pour chaque échantillon, soit 2 dépôts d'ADN.



Bon de commande à retourner à APBG - BP 8337 - 69356 Lyon cedex 08

Nom : ..... Prénom : .....

N° APBG : .....

Adresse complète : .....

Je commande . . . . .exemplaire(s) du kit « *Génome des plantes cultivées et biodiversité* » au prix de **72 €** le kit, TTC, plus 11 € de port - Réf. : **K12PLA**

Date prévue pour le TP : .....

Je joins à ma commande :

un chèque bancaire à l'ordre de l'APBG

un bon de commande de mon établissement

## L'uranium, un métal stratégique, 70 ans d'histoire minière

Pierre-Christian Guillard et Régis Mathieu

### Introduction

L'uranium est un métal gris-blanc de symbole U dont la découverte est relativement récente (1841). Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, le minerai d'uranium n'était prospecté que parce qu'il contenait du radium, élément découvert par Pierre et Marie Curie en 1898. Ce n'est qu'au début de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale que l'uranium va devenir l'objet de nombreuses convoitises après la découverte de la fission nucléaire. Après la guerre, une intense prospection de l'uranium se développe. En France, le premier gisement de pechblende massive est découvert en 1948, à La Crouzille en Haute-Vienne (filon Henriette), par les prospecteurs du Commissariat à l'Énergie Atomique.

Initiée depuis l'Antiquité pour composer des colorants, puis dédiée majoritairement à la fabrication de combustible dans les réacteurs nucléaires industriels, la production d'uranium, après une période d'accroissement rapide entre 1948 et 1955, connaît une phase de surproduction dans les années 60 et en conséquence de récession (compétition avec d'autres ressources énergétiques à bas prix, ralentissement des programmes d'installation de centrales électronucléaires et de prospection dans certains pays). Après la crise pétrolière de 1973, la construction de nouvelles centrales et la production d'uranium connaissent de nouveau une phase d'expansion très rapide jusqu'en 1980. Une seconde période difficile apparaît ensuite avec le fort ralentissement de l'économie mondiale, diminuant considérablement

► **Mots clés** : uranium, utilité, radioactivité, distribution, minéraux, roches, gisements, teneur, classifications, prospection, mine, lixiviation, mémoire, usine, traitement, filon, stratégie, économie.

■ **Pierre-Christian Guillard** : Docteur en histoire des techniques, auteur d'une vingtaine d'ouvrages consacrés au patrimoine minier et à l'histoire minière (charbonnages, or, uranium, tungstène, antimoine et métaux non-ferreux), passionné de minéralogie et de prospection il a également exploité artisanalement l'or alluvionnaire dans le Grand Nord canadien pendant 10 ans. Responsable des archives et de la documentation géologique et minière du groupe AREVA. Chargé de mission à l'installation et la gestion d'un nouvel atelier de fabrication de lames minces (litholamellage) et l'installation d'un atelier d'instrumentation et de métrologie

■ **Régis Mathieu** : Titulaire d'un doctorat en géosciences de l'Institut National Polytechnique de Lorraine géologue d'exploration au sein de la filiale COGEOBI en Mongolie. Directeur Géosciences successivement sur de nombreux sites d'exploitation dans le monde. Actuellement directeur de l'établissement Orano de Bessines-sur-Gartempe en Haute Vienne.

les besoins énergétiques, la recherche d'économies d'énergie, la baisse du prix du pétrole, la découverte d'importants gisements d'uranium à forte teneur, la mise au point de nouveaux types de combustibles conduisant à une diminution de la consommation d'uranium dans les centrales et la pression des groupes écologiques. Depuis plusieurs années, malgré un sursaut en 2007, le marché reste déprimé et la prospection de l'uranium est très fortement ralentie dans la plupart des pays, les prix du métal demeurent très bas.

Émetteur de rayonnements  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ , l'uranium est l'un des rares éléments naturels radioactifs. Il est présent sans exception dans tous les milieux naturels qui nous entourent (roches, sols, sédiments, eaux, faune, flore...). On le rencontre dans des environnements géologiques très variés et à toutes les époques géologiques, depuis 3 milliards d'années jusqu'à nos jours. Dans la croûte terrestre, les teneurs moyennes sont d'environ 3 g/t. Trois grandes familles de minéraux contenant de l'uranium sont distinguées : les minéraux primaires à uranium tétravalent aussi dénommés produits noirs tels que pechblende et uraninite, les minéraux secondaires à uranium hexavalent tels que l'autunite et chalcocite et les minéraux avec de l'uranium en substitution tels que la monazite et l'allanite. Les roches telles que des granites acides ou des croûtes d'altération présentent des teneurs plus élevées et forment des zones préconcentrées favorables à la mise en place de gisements.

Basées sur des critères descriptifs ou génétiques, soit mixtes, de nombreuses classifications des gisements d'uranium ont été établies. La classification de référence de l'AIEA en 1996 a répertorié 582 gisements d'uranium répartis dans 48 pays. Quinze types de gisements y ont été individualisés en fonction de leur contexte géologique : les gisements liés à des discordances d'âge protérozoïque (Cigar Lake, Canada), les gisements renfermés dans des grès (Torkuduk, Kazakhstan), les gisements liés à des complexes bréchiques (Olympic Dam, Australie), les gisements liés à des conglomérats à galets de quartz (bassin du Witwatersrand, Afrique du Sud), les gisements intrusifs (Rössing, Namibie), les gisements associés à des roches volcaniques (Streltsovskaya, Russie), les gisements filoniens (Henriette, Limousin), les gisements métasomatiques (Mirchinskoye, Ukraine), les gisements associés aux phosphates (Gantour, Maroc), les gisements superficiels (Yeelirrie, Australie), les gisements métamorphiques (Mary Kathleen, Australie), les gisements en remplissage de cheminées bréchiques (Breccia pipes, USA), les schistes noirs renferment des quantités non négligeables d'uranium à faible teneur sur de grandes surfaces (Randstad, Suède), les lignites et charbons impurs, ressources non conventionnelles d'uranium estimées à plusieurs millions de tonnes (Dakota, USA) et les gisements difficiles à classer dans les catégories précédentes, peu abondants. Les deux premiers types de gisements d'uranium cités ci-dessus fournissent la majeure partie de la production mondiale d'uranium actuellement. Les ressources en uranium sont largement réparties sur l'ensemble de la planète : 44 % dans les pays de l'OCDE, 22 % dans les BRICS et 34 % dans le reste du monde ce qui permet de limiter les risques géopolitiques associés. Les gisements les plus importants se trouvent sur les cinq continents, de l'Afrique (Niger, Afrique du Sud) à l'Asie (Kazakhstan, Ouzbékistan, Mongolie), en passant par l'Europe (Ukraine, Russie), l'Océanie (Australie) et l'Amérique (Canada, Brésil, États-Unis). La prospection de l'uranium utilise toutes

les méthodes classiques directes (géochimie, sondages) ou indirectes (cartographie, géophysique) mais sa principale originalité réside dans la mesure de la radioactivité associée grâce à des compteurs spécifiques tels que le compteur Geiger.

Après plus de 50 années où les méthodes classiques (mine à ciel ouvert, travaux miniers souterrains, lixiviation en tas) ont dominé dans les exploitations d'uranium, la lixiviation in-situ contribue désormais à plus de 50% de la production mondiale d'uranium. Les gisements métropolitains, ayant donné lieu à des exploitations sont répartis en une dizaine de districts situés en bordure des deux grandes unités granitiques hercyniennes que sont les Massif armoricain et le Massif Central. Outre le district historique du Morvan (St Symphorien et Grury), les principaux districts uranifères français ont été ceux de la Vendée (Ecarpière avec la 1<sup>ère</sup> usine de traitement équipée dès 1957), du Limousin (Crouzille et Jouac) et du Lodévois (Le Bosc). Avec 23 324 tonnes d'uranium, la Division Minière de la Crouzille a produit plus de 31 % de l'uranium extrait en France. La mine la plus riche, Jouac, fût la dernière mine d'uranium située sur le territoire français à fermer en 2001.

Aujourd'hui, cette histoire minière est préservée à UREKA, dans un musée de la mine d'uranium situé à Bessines sur Gartempe en Limousin, grâce à des témoignages, des objets, des photos, des films, des tranches de vie uniques et universelles d'hommes et de femmes qui ont œuvré jour après jour au cœur des mines.

## L'Uranium

### Historique

En 1789, le chimiste prussien Klaproth découvrait l'existence de l'uranium dans le minerai des mines de Jachymov (actuelle Slovaquie). Un siècle plus tard, le physicien français Henri Becquerel découvrait la radioactivité naturelle. Les usages de l'uranium étaient alors limités à la coloration des verres et des émaux, à la chimie et aux alliages à forte densité. Dès le début du XX<sup>ème</sup> siècle, la découverte du radium par Pierre et Marie Curie provoqua un intérêt pour les minerais radioactifs. En 1905, Hippolyte Marlot tentait d'exploiter le radium contenu dans l'autunite (phosphate d'uranium) à Saint-Symphorien de Marmagne (Saône-et-Loire). En 1925, Ernest Thave découvrait le gisement de Lachaux (Puy-de-Dôme). En 1942, le premier réacteur nucléaire était mis en route à Chicago par Fermi suivi en 1945 par les explosions nucléaires de Hiroshima et Nagasaki, ces deux événements affirmèrent l'intérêt énergétique et militaire de l'uranium.

En 1945, avec la création du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique), les prospecteurs s'intéressèrent aux gisements historiquement connus dès le XIX<sup>ème</sup> siècle en Limousin et dans le Morvan. En 1948, le premier filon de pechblende était découvert à la Crouzille en Haute-Vienne, par la suite exploité à la mine d'Henriette (figure 1). Pendant ce temps, les travaux de prospection aboutissaient dès 1951 à la découverte des principaux gisements qui firent du Limousin le plus important district uranifère français. Dans le Morvan, en Vendée, dans le Forez, les découvertes s'enchaînèrent faisant de la France un producteur d'uranium européen majeur.



Fig. 1 La mine Henriette à Saint-Sylvestre (Haute-Vienne) (1952 – photo CEA)

En 1954, des sociétés privées (SIMURA, SCUMRA, CFMU, Dong-Trieu...) découvrirent et mirent en exploitation des petits gisements situés dans le Morbihan, en Creuse, en Corrèze, dans l'Aveyron, le Cantal et en Lozère. En 1957, le gisement de Lodève (Hérault) était découvert et plusieurs usines de traitement chimique des minerais furent construites à Gueugnon (Saône-et-Loire), à l'Écarpière (Vendée), à Bessines-sur-Gartempe (Haute-Vienne) et à Saint-Priest Laprugne. En 1965, Le CEA possédait environ 65 % des réserves exploitées, les privés se répartissaient les 35 % restants.

La production d'uranium, après une période d'accroissement rapide entre 1948 et 1955, connaît une phase de surproduction dans les années 60 et en conséquence de récession. En 1973, conséquence du « choc pétrolier », la France fit alors le pari d'une indépendance énergétique basée sur le nucléaire. Les mines du CEA étaient en pleine production et de nouveaux gisements furent ouverts par les sociétés privées en Limousin, en Lozère et en Aveyron où furent installées des nouvelles usines de traitement de minerai. En 1974, le gisement de Coutras (Gironde) était découvert et, malgré ses 20 000 tonnes de réserves, il resta inexploité.

En 1976, le CEA transféra ses actifs miniers à sa filiale COGEMA (Compagnie Générale des Matières nucléaires) chargée d'exploiter les mines d'uranium métropolitaines. Dans le même temps, à Jouac (Haute-Vienne), le riche gisement du Bernardan était découvert par les prospecteurs de la société Dong-Trieu tandis que dans l'Hérault, la mine et l'usine du Bosc, près de Lodève, entraient en production en 1981.

En 1979, l'accident de Three-Mile Island aux Etats-Unis, la pression des groupes écologiques, la recherche d'économies d'énergie, la baisse du prix du pétrole, la découverte d'importants gisements d'uranium à forte teneur et la mise au point de nouveaux types de combustibles conduisirent à une diminution de la consommation d'uranium dans les centrales et à une chute des cours. Toutefois, en France, les progrès techniques et les restructurations permirent aux mines françaises de faire face à la crise jusqu'en 1988. Cette année signa un record de production avec

3 420 tonnes d'uranium produites soit 5,6 % de la production mondiale estimée à 61 000 tonnes. Le marché de l'uranium atteindra néanmoins à la fin de l'année 2000 son plus bas niveau historique (avec un prix spot à 7,1US\$/livresU3O8). À compter de cette date, les fermetures de mines se succédèrent jusqu'au 31 mai 2001, date à laquelle la mine de Jouac (Haute-Vienne), dernière mine d'uranium française, cessa son activité, clôturant un demi-siècle d'histoire minière de l'uranium en France. Entre 1948 et 2001, 76 000 tonnes d'uranium métal furent produites à partir de huit usines de traitement et près de 250 sites répartis sur 26 départements. En 2005, la hausse des cours de l'uranium, portée par des perspectives dynamiques pour le développement du nucléaire dans le monde, a entraîné la relance des explorations. Ce regain a été stoppé en 2008 avec la crise financière, puis en 2011, avec l'accident de Fukushima. Depuis 10 ans, le marché reste déprimé et la prospection de l'uranium est très fortement ralentie dans la plupart des pays, les prix du métal demeurent très bas. (figure 2).



Fig. 2 Évolution des prix spot (US\$) de l'uranium (livres d'U3O8) de 1988 à 2019 (UxC).

### Propriétés physico-chimiques

L'uranium sous sa forme élémentaire se présente comme un métal gris-blanc, de symbole U, de densité 18,95 et fondant à une température de 1135°C. Il est le 92ème de la classification périodique des éléments de Mendeleïev, de la famille des actinides et sa masse atomique est de 238,07.

Émetteur de rayonnements  $\gamma$ ,  $\beta$  et  $\alpha$ , l'uranium est l'un des rares éléments naturels radioactifs avec le thorium et le potassium 40. C'est le 48ème élément naturel le plus abondant dans la croûte terrestre. L'uranium que l'on trouve dans les roches, les eaux et les minerais, présente une composition isotopique constante (sauf tout à fait exceptionnellement comme dans le cas du « réacteur naturel » d'Oklo au Gabon ; AIEA, 1975).

Les isotopes constituant l'uranium naturel s'associent actuellement dans les proportions massiques de :

$^{238}\text{U}$	99,27 %	(demi-vie = $4,47 \times 10^9$ ans)
$^{235}\text{U}$	0,72 %	(demi-vie = $7,04 \times 10^8$ ans)
$^{234}\text{U}$	0,0054 %	(demi-vie = $2,48 \times 10^5$ ans)

Les isotopes  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$  sont les pères de deux familles radioactives dont les produits stables de filiation sont deux isotopes stables du plomb ( $^{206}\text{Pb}$  et  $^{207}\text{Pb}$ ), alors que l'isotope  $^{234}\text{U}$  est un des éléments de la chaîne de désintégration de  $^{238}\text{U}$ . La période radioactive de  $^{238}\text{U}$  étant beaucoup plus longue que celle de  $^{235}\text{U}$ , le rapport  $^{235}\text{U} / ^{238}\text{U}$  a diminué au cours de l'histoire de la Terre. Les deux isotopes stables du plomb sont utilisés avec les deux isotopes de l'uranium pour dater les roches.

Les isotopes de l'uranium  $^{234}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$  sont des sources précieuses pour la production des transuraniens (fissilité de  $^{235}\text{U}$ ).

Le métal n'existe pas l'état natif et cristallise selon trois variétés :

- orthorhombique, stable jusqu'à  $667^\circ\text{C}$ ,
- quadratique jusqu'à  $775^\circ\text{C}$ ,
- cubique centré jusqu'à la fusion ( $1135^\circ\text{C}$ ).

L'uranium est un élément lithophile, c'est-à-dire ayant une forte affinité pour l'oxygène avec lequel il forme de nombreux oxydes. Il possède 5 valences ( $2^+$ ,  $3^+$ ,  $4^+$ ,  $5^+$  et  $6^+$ ), dont les 2 principales subsistent en milieu réducteur ( $\text{U}^{4+}$ ) et en milieu oxydant ( $\text{U}^{6+}$  instable, très soluble). Les valences ( $2^+$ ) et ( $3^+$ ) ne sont obtenues qu'expérimentalement en laboratoire. La valence ( $5^+$ ) existe dans les solutions naturelles, mais elle est très difficile à mettre en évidence. L'uranium est attaqué par l'air et par l'eau. Le métal est très fortement électro-négatif, il décompose l'eau à l'ébullition, s'oxyde à l'air humide et est attaqué par les acides. En milieu acide, il se présente sous forme de sels d'uranyle  $\text{UO}_2^{2+}$  et de complexes uranyle. En milieu basique, il se présente sous forme de sels d'uranates.

### Principales utilisations de l'uranium

L'uranium est principalement utilisé comme combustible (65 000 tonnes par an d'uranium naturel sont produites par les mines dans le monde ; converti et enrichi en isotope 235, l'oxyde d'uranium est mis en pastilles empilées dans des crayons forme de base du combustible nucléaire) (figure 3) dans la plupart des réacteurs nucléaires industriels (450 réacteurs dans le monde). Sous un flux de neutrons, il subit des fissions formant des noyaux de masse inférieure à celle de l'uranium et générant de nouveaux neutrons. Ces nouveaux

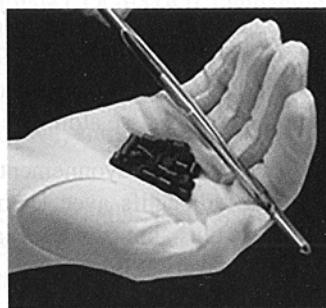


Fig. 3 Pastilles d' $\text{UO}_2$

neutrons peuvent à leur tour entraîner des fissions sur des atomes voisins, c'est la réaction « en chaîne ». Lors de ces réactions de fissions nucléaires, l'énergie est dissipée sous forme de chaleur qui est ensuite utilisée pour faire tourner des turbines générant de l'électricité.

L'uranium naturel est également utilisé depuis l'Antiquité, sous forme d'oxyde (concentrations de 0,1 à 1 %  $\text{UO}_2$ ), comme colorant des verres, céramiques et faïences pour leur donner des reflets/nuances vert à jaune (figure 4).



Fig. 4 Objets en verre (ouraline) teinté avec des sels d'uranyle (Collection P.C. Guillard).

Du fait de ses densité et dureté élevées, l'uranium appauvri est aussi utilisé dans l'armement sous forme métallique dans des têtes d'obus conventionnels percutants destinés à perforer le blindage des chars ou abris béton. La densité de l'uranium est également intéressante pour fabriquer des lests, contrepoids, masses d'équilibrage, volants de gyroscopes, ailerons et gouvernes d'avions. Il y aurait eu jusqu'à 450 kg d'uranium appauvri dans les premiers avions de type B 747.

L'uranium hautement enrichi peut-être irradié dans des réacteurs de recherche pour la production de radioéléments ( $^{99}\text{Tc}$ ) utilisés comme traceurs en imagerie médicale.

### L'uranium dans la nature

#### Distribution à l'échelle du globe terrestre

La teneur globale de la croûte terrestre en uranium est de 2,7 ppm, soit 2,7 g/t (figure 5). On ne possède pas de donnée directe sur la teneur en U des éléments constitutifs autres que la croûte du globe terrestre (manteau, noyau). Si l'on admet pour la Terre primitive une constitution de chondrite (météorite), sa teneur moyenne initiale en uranium aurait été de 0,02 ppm.

La croûte, qui a une épaisseur d'environ trente kilomètres (figure 5), renfermerait ainsi l'essentiel du stock en uranium de la Terre, soit 50 % à 75 % du total selon les modèles. De plus, la presque totalité de l'uranium est concentrée dans les dix kilomètres superficiels de la croûte (zone des granites).

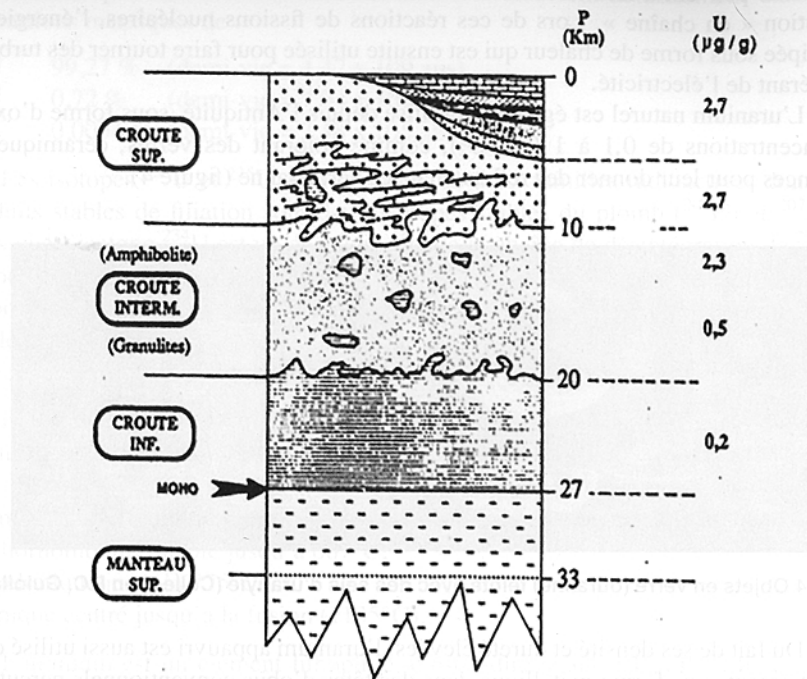


Fig. 5 Distribution des teneurs en uranium dans une coupé de la croûte terrestre.

Le phénomène par lequel l'uranium se retrouve concentré dans la croûte terrestre correspond à un fractionnement géochimique entre la croûte et le manteau et le noyau (facteur d'enrichissement d'à peu près 300). On explique la pauvreté du manteau en uranium par le fait que cet élément est trop volumineux (incompatible) pour trouver sa place dans les réseaux cristallins très serrés des minéraux silicatés de basse température de fusion (olivines, pyroxènes, feldspaths calciques...) qui sont les constituants principaux du manteau. L'uranium a donc tendance, lors de la cristallisation des magmas, à se concentrer dans la dernière fraction liquide, pour finalement se retrouver dans les minéraux silicatés qui cristallisent en dernier (feldspaths calco-sodiques, micas, minéraux accessoires...).

#### Distribution dans les milieux naturels

L'uranium est présent en proportions très variables dans tous les milieux naturels sans exception. Les chiffres rassemblés dans le Tableau 1 pour les principaux types de roches, les sols, les eaux et les organismes vivants, donnent une bonne idée de la variation de la teneur moyenne en uranium des milieux naturels. Cette teneur augmente considérablement à proximité des préconcentrations naturelles (granites fertiles, phosphates uranifères) et a fortiori, des gîtes d'uranium.

MILIEUX NATURELS	URANIUM (ppm)
<b>ROCHES MAGMATIQUES</b>	
- ultrabasiques (péridotites...)	0,02
- basiques (basaltes, gabbros...)	0,6
- intermédiaires (andésites, granodiorites...)	2,0
- acides (granites, rhyolites...)	4,5
<b>ROCHES SEDIMENTAIRES</b>	
- arénites (conglomérats, grès...)	1,5
- lutites (argilites...)	3,5
- chimiques (carbonates / siliceuse)	1,5 / 2,0
- évaporites (gypse, sel, ...)	0,1
<b>ROCHES METAMORPHIQUES</b>	
- méta-arénites	1,5
- schistes, micaschistes	2,0
- gneiss	3,0
<b>LES SOLS ET LES DÉTRITUS DE L'ALTÉRATION SUPERGÈNE</b>	
- détritits des roches usuelles	0,02 à 4,5
- chapeaux de fer, sols ferrugineux	1 à 100
- sols	0,5 - 3
- croûtes (calcrètes, silcrètes...)	1 à 250
<b>ORGANISMES VIVANTS ET PRODUITS DE DÉCOMPOSITION CORRESPONDANTS</b>	
- flore	
. algues	0,5 à 50
. mousses	0,5 à 5
. plantes terrestres	0,003 à 0,2
- faune	
. aquatique	0,2 à 0,5
. terrestre	0,003 à 0,08
- produits de décomposition	
. tourbes	0,05 à 0,3
. lignites	0,05 à 0,3
. hydrocarbures	0,005
. bitumes	0,5 - 3
<b>EAUX COURANTES OU DE SOURCES ET NAPPES SOUTERRAINES (ppb)</b>	
- océans et mers	1 à 6
- rivières, lacs, étangs	0,1 à 0,4
- nappes aquifères souterraines	0,5 à 2,5

Tableau 1 - Abondance de l'uranium dans différents milieux naturels.

Là où le milieu présente des caractères physico-chimiques favorables, le processus de concentration s'enclenche et perdure tant que ceux-ci demeurent, par exemple :

- par adsorption (fixation d'ions à la surface de corps solides), absorption sur les ions hydratés du fer, sur les oxydes de manganèse ou des complexes argilo-organiques (humus),
- par floculation et formation de gels et de complexes silico-alumineux,
- par précipitation, soit par évaporation (sebkra), soit par changement brutal des conditions environnantes (fronts d'oxydo-réduction, griffons des sources).

Dans les roches elles-mêmes, l'uranium est localisé dans plusieurs sites. Il peut :

- être l'élément essentiel de certains minéraux,
- se présenter en substitution dans des minéraux pour la plupart très communs, mais généralement peu abondants dans les roches et appelés pour cette raison minéraux accessoires,
- être en traces dans les principaux minéraux constituant les roches,
- s'adsorber sur la surface des minéraux,
- s'associer avec la matière organique,
- être à l'état dissous dans les fluides géologiques, interstitiels à intergranulaires.

### *L'uranium dans les minéraux des roches*

L'uranium, dans ses minerais, se trouve le plus souvent sous forme de produits noirs dont le principal est la «pechblende», un oxyde qui se présente en concrétions ou finement disséminé dans la roche. Les parties superficielles des gisements présentent une grande variété de minéraux oxydés et colorés. Trois groupes de minéraux uranifères sont classiquement distingués : les minéraux à uranium essentiellement tétravalent ( $U^{4+}$ ), encore appelés minéraux «primaires» de couleur généralement noire, et les minéraux à uranium hexavalent ( $U^{6+}$ ) ou minéraux «secondaires» et présentant toujours des couleurs vives (Tableau 2) ainsi que des minéraux avec l'uranium en substitution.

#### *Les Minéraux « primaires » d'uranium ( $U^{4+}$ )*

L'uraninite,  $UO_2$ , de forme cubique est le principal minéral d'uranium tétravalent (Tableau 2).

Sa composition n'est pas uniforme et s'écrit plus précisément  $UO_{2+x}$  avec  $0,1 < x < 0,7$  selon le degré d'oxydation de l'uranium. Le terme de pechblende correspond à une morphologie particulière en sphérules (figure 6a).

Sa masse volumique est élevée,  $10 \text{ g/cm}^3$ , et sa dureté un peu inférieure à celle de l'acier. Les oxydes d'uranium sont de couleur noire, présentent une cassure conchoïdale et un éclat brillant. Lorsqu'ils sont oxydés, ils deviennent ternes et ont tendance à s'hydrater.

Sous la forme très hydratée,  $UO_3 \cdot nH_2O$ , ils prennent des couleurs allant du noir au jaune, à l'orangé, au rouge et au brun et sont alors appelés gummities (figure 6b). Les gummities résultent de l'altération des uraninites et de la pechblende. Le faciès uraninite cristallise à des températures supérieures à  $300^\circ\text{C}$  environ et peut contenir des quantités importantes d'éléments à grand rayon ionique tels que le

thorium et les terres rares. C'est, par exemple, la forme rencontrée dans les roches granitiques et les pegmatites riches en uranium.

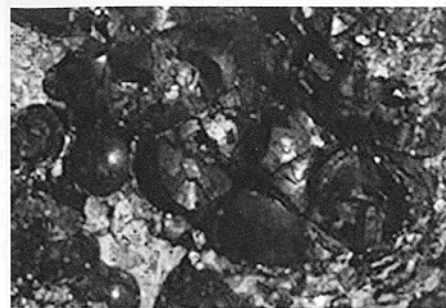


Fig. 6a Nodules de pechblende (Bauzot - 71).



Fig. 6b Uraninite (faciès «œil de perdrix») auréolée de produits jaunes (Margnac - 87).

La pechblende cristallise généralement en dessous de cette température et peut contenir des quantités importantes d'éléments tels que le calcium, le manganèse, la silice, le plomb radiogénique tandis que le thorium et les terres rares sont peu souvent en concentrations supérieures à 1%. Ces éléments, comme le calcium, caractérisent le chimisme des solutions qui ont transporté l'uranium jusqu'à son lieu de dépôt et le chimisme de ce milieu de dépôt ou des altérations postérieures. La pechblende est le principal minéral d'uranium exploité dans les gisements.

#### *Les Minéraux « secondaires » d'uranium ( $U^{6+}$ )*

Il s'agit d'un vaste groupe de minéraux comprenant plus de 400 espèces (Tableau 2).

Ils sont tous formés à partir du radical uranyle ( $UO_2^{2+}$ ) associé à différents types d'anions complexes (hydroxydes, silicates, phosphates, vanadates, arsénates, sulfates, carbonates) et à un nombre variable de molécules d'eau. Des cations additionnels sont également présents dans certaines espèces. Leur structure est souvent de type mica avec un clivage parfait, d'où le nom de micas d'uranium qui leur est parfois donné. Ils présentent fréquemment une couleur jaune, d'où l'appellation de «produits jaunes». Ils sont translucides à transparents et forment de très belles cristallisations extrêmement fragiles. Ils ont représenté des indicateurs facilement reconnaissables lors des premières prospections pour la recherche des minéralisations uranifères proches de la surface.

Certains d'entre eux, la plupart des phosphates, sulfates et carbonates, sont fluorescents lorsqu'ils sont éclairés avec de la lumière ultraviolette, propriété qui a également été utilisée en prospection dans les années 1950 - 1970. La carnotite, la tyuyamunite, l'autunite et la chalcocite (figures 6c et 6d) sont les espèces les plus fréquentes.

Minéraux «primaires» d'uranium (U4+)	
Uraninite	: $UO_2, x UO_3$
Pechblende	: $UO_2, y UO_3$ ( $y > x$ )
Coffinite:	: $U(SiO_4)1 - x(OH)_{4x}$
Brannerite	: $(Ti, Fe)_2O_6(U, Ca, Ce, Y, Th)$
Uranothorianite	: $(U, Th)O_2$
Davidite	: $(Fe, La, U, Ca, V, Th, Cr)_6(Ti, Fe)_{15}(O, OH)_{36}$
Thorite	: $ThSiO_4$
Minéraux «secondaires» d'uranium (U6+) (plus de 400 espèces connues)	
Uranotile	: $Ca(UO_2)_2Si_2O_7, 6 H_2O$
Uranophane	: $(H_3O)_2Ca (UO_2)_2 (SiO_4)_2, 3H_2O$
Autunite	: $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2, 10 H_2O$
Chalcolite	: $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2, 10 H_2O$
Francevillite	: $(Ba,Pb)(UO_2)_2(VO_4)_2, 5 H_2O$
(Cupro-)sklodowskite	: $(H_3O)_2Mg$ (ou $Cu$ ) $(UO_2)_2 (SiO_4)_2, 4H_2O$
Carnotite	: $K_2(UO_2)_2(UO_4)_2, 3 H_2O$
Tyuyamunite	: $Ca(UO_2)_2(VO_4)_2, 5 H_2O$
Minéraux accessoires (U en substitution)	
Zircon	: $ZrSiO_4$
Monazite	: $TR_1(PO_4)$
Xénotime	: $(Y, TRL, U)PO_4$
Allanite	: $(Ca, Ce, La, Th, U...)(Al, Fe)(Al_2Si_6O_{12})$
Sphène	: $CaTiSiO_5$
Apatite	: $Ca_5(PO_4)_3(OH, F, Cl, CO_2, U)$
TRL	= terres rares légères
TRL	= terres rares lourdes

Tableau 2 - Principaux minéraux à uranium.

### L'uranium en substitution dans les minéraux accessoires

L'uranium se substitue à certains éléments (Th, Ca, Zr) dans la structure des minéraux accessoires. Sa concentration reste mineure, quelques dizaines de ppm à quelques pour cent. Les minéraux les plus courants sont par ordre d'abondance moyenne décroissante en uranium : le xénotime, la monazite, le zircon, l'allanite, le sphène et l'apatite.

La monazite est le phosphate de terres rares légères (TRL) monoclinique, de formule générale  $TR(PO_4)$  ou plus particulièrement  $Ce(PO_4)$  (figure 6e).

Les terres rares lourdes y sont présentes en très faible concentration et l'yttrium peut atteindre plusieurs pour cent. Les teneurs en uranium sont généralement de l'ordre du millier de ppm, mais peuvent atteindre plusieurs pour cent dans les zones de croissance externes de monazite ayant cristallisé en association avec de l'uraninite. Ce minéral n'est stable généralement que dans les roches magmatiques ou métamorphiques pauvres en calcium. Dans les conditions de l'altération

superficielle, ce minéral est très résistant et est entraîné par les rivières pour former des accumulations dans les sables de certaines plages où il est alors exploité principalement pour les terres rares.

L'allanite  $(Ca, Ce, La, Th, U...)(Al, Fe)Al_2Si_6O_{12}$ , appartient au groupe des épidotes monocliniques (figure 6f). Elle se caractérise par ses fortes teneurs en terres rares légères (quelques pour cent à 20 %), en thorium (de l'ordre du pour cent en général, jusqu'à 4,9 %) et en uranium (quelques dizaines à quelques centaines de ppm). L'allanite s'observe dans les roches magmatiques et métamorphiques riches en calcium où elle représente, avec le sphène, le principal minéral de terres rares légères, comme l'est la monazite pour les roches pauvres en calcium. Elle est très fréquemment métamicté.



Fig. 6c Autunite (Marnac - 87).

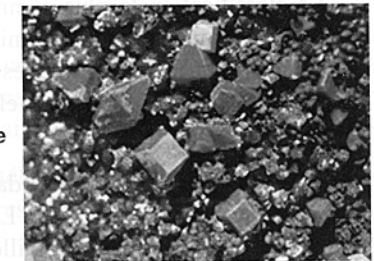


Fig. 6d Chalcolite (vert) et francevillite (jaune orangé) (Gabon).



Fig. 6e Monazite (Madagascar).

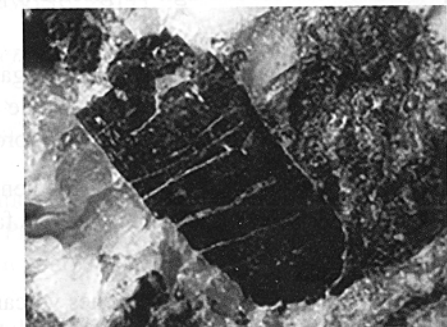


Fig. 6f Allanite (Bulgarie).

### Contexte géologique des gisements d'uranium

Un gisement est une concentration naturelle et exploitable de substances minérales. Pour qu'ensuite une concentration minérale soit exploitable, il faut que l'on puisse extraire le métal à un coût considéré comme économiquement rentable à une époque déterminée. Le caractère économique d'un gisement dépend de plusieurs facteurs dont les principaux sont : (1) la localisation géographique, (2) la taille du gisement, (3) la teneur du ou des métaux, (4) la profondeur, (5) le coût du traitement et (6) les facteurs géopolitiques.

Les gisements d'uranium se sont formés dans des environnements géologiques extrêmement variés, depuis les zones les plus superficielles de la croûte terrestre à la température ambiante (cas des calcrètes), jusqu'à des profondeurs supérieures à 20 kilomètres, en contexte de métamorphisme granulitique (fortes pressions et températures).

De nombreuses classifications, parfois contradictoires, ont été établies. Elles sont basées sur des critères, soit descriptifs, soit génétiques, soit spécifiques (structuraux par exemple), soit mixtes (combinaison des différentes approches). La diversité des processus géologiques impliqués dans la genèse des gisements d'uranium rend délicate et sujette à controverse toute classification génétique.

La classification la plus communément utilisée est celle établie par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA, 1996) à partir de celle publiée par Dalkhamp (1993). Les ressources mondiales en uranium y sont classées, d'après le contexte géologique dans lequel elles se trouvent, en quinze types principaux de gisements :

- 1 - Gisements liés à des discordances d'âge protérozoïque. Ils sont localisés au Canada (MacArthur River, Cigar Lake) et en Australie (Ranger), se caractérisent par leurs très fortes teneurs et leur taille importante.
- 2 - Gisements renfermés dans des grès. Ils sont exploités par des méthodes classiques au Niger (Arlit) et par lixiviation en place aux États-Unis, Kazakhstan (Tortkuduk, Inkai), Ouzbékistan.
- 3 - Gisements liés à des complexes bréchiques. Un seul gisement entre dans cette catégorie, celui d'Olympic Dam en Australie, où l'uranium est extrait comme sous-produit du cuivre. Il s'agit du gisement possédant les plus importantes ressources d'uranium au monde.
- 4 - Gisements liés à des conglomérats à galets de quartz. Ce sont les plus vieux gisements connus sur Terre (Archéen). Ils ne sont plus exploités qu'en Afrique du Sud où l'uranium est récupéré comme sous-produit de l'or.
- 5 - Gisements intrusifs. Un seul gisement de ce type est en exploitation, celui de Rössing en Namibie, où l'uranium à très faible teneur est disséminé dans des roches granitiques.
- 6 - Gisements associés à des roches volcaniques. Un seul gisement Streltsovka est aujourd'hui en cours d'exploitation, dans le district de Krasnokamensk en Russie.

7 - Gisements filoniens. Ils ont eu leur heure de gloire dans les années 1950 - 1980 où ils étaient exploités dans de nombreux pays (Allemagne, Tchécoslovaquie, France, Canada, Espagne, Australie...).

8 - Gisements métasomatiques. Ils fournissent l'essentiel de la production de l'Ukraine (Miruchinskoye, Krivoï Rog, Ukraine) et du Brésil (Itataia).

9 - Gisements associés aux phosphates (tel que Gantour au Maroc). L'uranium de ce type est considéré comme une ressource non conventionnelle qui se chiffre cependant à plusieurs millions de tonnes.

10 - Gisements superficiels. Ce sont des gisements d'âge récent qui se sont formés en surface dans des dépôts meubles.

11 - Gisements métamorphiques. Très diversifiés, généralement de petite taille, ils ont fréquemment été exploités dans le passé (Zaire, Canada, Australie, Inde...).

12 - Gisements en remplissage de cheminées bréchiques. Connus qu'aux États-Unis (Breccia pipes dans l'Arizona), où ils ne sont plus exploités.

13 - Les schistes noirs renferment des quantités non négligeables d'uranium à faible teneur sur de grandes surfaces (Suède, États-Unis, Allemagne, Russie...). Ils représentent des ressources d'uranium non conventionnelles se chiffrant à plusieurs millions de tonnes.

14 - Les lignites et charbons impurs. Ces formations, très bien représentées à la surface de la Terre, sont également des ressources non conventionnelles d'uranium estimées à plusieurs millions de tonnes (États-Unis, Russie, Grèce, Chine...).

15 - Les gisements difficiles à classer dans les catégories précédentes, peu abondants au demeurant, sont regroupés sous le terme «autres types de gisements» (États-Unis, Chine...).

Les deux premiers types de gisements d'uranium cités ci-dessus fournissent la majeure partie de l'uranium produit actuellement. Ces quinze types de gisements d'uranium comprennent 582 gisements de plus de 500 tonnes d'uranium à une teneur d'au moins 0,03 % (AIEA, 1996). Ils sont répartis dans 48 pays. Les 10 plus grandes mines d'uranium du monde en 2016 étaient : 1. MacArthur River, 2. Cigar Lake, 3. Tortkuduk et Muyunkum, 4. Olympic Dam, 5. Inkai, 6. Arlit, 7. Budenovskoye 2, 8. South Inkai, 9. Mynkuduk et 10. Ranger (WISE, 2017).

### Répartition géographique des gisements d'uranium

Les districts uranifères les plus importants sont situés (figure 7) :

- en Afrique du Sud (Witwatersrand) et au Canada (Elliot Lake) pour les gisements dans les conglomérats précambriens,
- au Canada (Saskatchewan) et en Australie (Territoires du Nord) pour les gisements liés spatialement aux discordances d'âge Protérozoïque,
- au Niger, aux États-Unis, au Kazakhstan et en Ouzbékistan pour les gisements de type grès,
- en Australie pour le gisement très particulier d'Olympic Dam,
- en Russie pour les gisements volcaniques de la caldeira de Streltsovka,



- en Tchécoslovaquie et en Allemagne avec le district filonien de l'Erzgebirge,
- en Suède pour le gisement de Randstat, dans les schistes noirs,
- en Ukraine pour les gisements liés à des métasomatites.

Dans ces districts, plus de 200 000 tonnes d'uranium ont été extraites et il y a encore des ressources importantes. Les régions présentant des gisements d'uranium de type et d'âge différents et des roches plus riches en uranium que la moyenne de la croûte supérieure sont appelées provinces uranifères.



Fig. 7 Distribution (%) des ressources en uranium (<130USD/kgU) identifiées (au 1/1/2015) (AIEA, 2016).

### Répartition chronologique des gisements d'uranium

Les études géochronologiques montrent que les gisements d'uranium se sont formés depuis l'Archéen jusqu'à nos jours, cependant la majorité d'entre eux s'est créée à des époques privilégiées de l'histoire de la Terre (Tableau 3). Certaines époques géologiques semblent plus favorables à la formation d'un type particulier de gisement. Cette relation pourrait également résulter d'une prospection incomplète ou du non-affleurement des gisements.

L'existence des gisements dans les conglomérats précambriens (Afrique du Sud, Canada), les plus anciens connus sur Terre, s'explique par l'effet combiné d'une faible quantité d'oxygène dans l'atmosphère et l'hydrosphère à l'ère de l'Archéen et d'une forte vitesse de sédimentation, ce qui a permis la conservation des uraninites détritiques. Les gisements tabulaires dans les grès se forment lors du développement des végétaux supérieurs à partir de 400 millions d'années.

ARCHEEN INFERIEUR (4,5 - 3,1 milliards d'années)	Pas de gisement exploitable
ARCHEEN SUPERIEUR ET PROTEROZOIQUE INFERIEUR (3,1 - 2,2 milliards d'années)	Concentrations primaires d'uranium détritique dans les conglomérats à galets de quartz (Afrique du Sud, Canada)
PROTEROZOIQUE INFERIEUR 2 milliards d'années	Premier gisement dans les sédiments, formé à partir d'un dépôt chimique de l'uranium (Oklo, Gabon)
PROTEROZOIQUE MOYEN (1,8 - 1,5 milliard d'années)	Principaux gisements liés aux albitites dans les socles (Canada, Russie, Brésil)
(1,5 - 0,9 milliard d'années)	Gisements liés aux discordances protérozoïques (Pine Creek, Australie et Saskatchewan, Canada) Gisements liés à des complexes bréchiques (Olympic Dam, Australie)
Au PERMO-CARBONIFERE (350 - 250 millions d'années)	Gisements dans les grès (Arlit et Akouta au Niger) Gisements filoniens liés aux granites (Vendée, Limousin en France, Erzgebirge en Allemagne) Gisements tectono-lithologiques (Lodève, France)
A partir du JURASSIQUE (200 - 140 millions d'années)	Gisements de «type roll» (Etats Unis, Kazakhstan, Ouzbékistan) Gisements volcaniques (Streltsovka, Russie)
A partir du TERTIAIRE (65 millions d'années)	Gisements de type basal (Blizzard, Canada) Gisements stratiformes dans des grès (Coutras, France) Gisements volcaniques (Mexique)
TERTIAIRE - QUATERNAIRE	Gisements superficiels de type calcrète (Yeelirrie, Australie)

Tableau 3 - Répartition dans le temps des gisements d'uranium.

À la différence des énergies carbonées dont les ressources sont en général géographiquement concentrées, l'uranium est une ressource abondante et bien répartie sur l'ensemble de la planète : 44 % se trouvent dans les pays de l'OCDE, 22 % dans les BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud) et 34 % dans le reste du monde (figure 7). Cet atout permet de limiter les risques géopolitiques liés à cette ressource. Les gisements les plus importants se trouvent sur les cinq continents, de l'Afrique (Niger, Afrique du Sud) à l'Asie (Kazakhstan, Ouzbékistan, Chine, Mongolie), en passant par l'Europe (Ukraine, Russie), l'Océanie (Australie) et l'Amérique (Canada, Brésil, États-Unis).

Selon l'AIEA, les ressources mondiales identifiées dont le coût d'extraction est inférieur à 130 US\$/kgU représentent à ce jour plus de 5,9 millions de tonnes (Mt), soit l'équivalent d'un siècle de consommation au rythme actuel. La catégorie de coût supérieure (< 260 US\$/kgU), qui n'est pas exploitable en l'état actuel du marché, compte 7,63 Mt de ressources. Ces ressources additionnelles permettraient d'assurer plus de deux siècles de consommation.

Les mines fournissent la part la plus importante de l'offre en uranium (55 975 tonnes en 2015). Cependant, pour satisfaire l'ensemble de la demande (61 980 t),

des « sources secondaires » sont mobilisées. Ainsi, plus de 5 000 tonnes proviennent des stocks d'uranium (constitués dans les années 1980 lorsque l'offre excédait la demande), des matières fissiles issues du retraitement des combustibles usés et des stocks résultants du désarmement militaire de la Russie et des États-Unis.

À côté de ces sources, de nouveaux gisements non encore découverts pourraient voir le jour. Les études géologiques estiment à 10,6 Mt le potentiel des ressources dites pronostiquées ou spéculative. Si ces projections se vérifient, la durée de fonctionnement du parc nucléaire mondial serait accrue d'autant. Les ressources sont donc suffisamment abondantes pour assurer le développement du nucléaire tout au long du XXI<sup>ème</sup> siècle et au-delà.

### Prospection de l'uranium

La prospection de l'uranium utilise toutes les méthodes et outils géologiques classiques (figure 8) :

- Les méthodes directes :
  - radiométrie : pédestre, autoportée ou aérienne,
  - géochimie : sédiments, sols, roches, végétaux, eau,
  - émanométrie : radon (<sup>222</sup>Rn),
  - hydrogéochimie : uranium, radium, fluor, radon, hélium,
  - sondages et diagraphies : géologiques, d'estimation, miniers,
  - petits travaux miniers : tranchées, décapages, puits, galeries.
- Les méthodes indirectes :
  - cartographie géologique : télédétection et vérification sol,
  - télédétection : photos aériennes, télédétection multi- ou hyper-spectrale, télédétection thermique, radargraphie,
  - géophysique aérienne (avion, hélicoptère, drone) ou sol : méthodes électriques, magnétiques, électromagnétiques, sismiques et gravimétriques.



Campagne de géophysique électromagnétique Resolve tracté par hélicoptère (Mac Clean Lake, Orano, Canada ; © Régis Mathieu, Orano).



Campagne de forages d'exploration (Sud Tortkuduk, JV Katco, Kazakhstan ; © Régis Mathieu, Orano).

Fig. 8 Prospection d'uranium par géophysique aérienne et forages.

Sa principale originalité est d'utiliser en outre des techniques de prospection radiologique : le passage du compteur Geiger de quelques dizaines de chocs par seconde à quelques milliers indique la proximité d'un affleurement présentant une concentration potentiellement intéressante. L'activité du minerai dépend de sa concentration, et est de l'ordre de  $1,6 \times 10^6$  Bq/kg pour un minerai riche d'une teneur de 1%. Dans des gisements exceptionnels comme ceux du Canada, la teneur moyenne peut aller jusqu'à 20%.

Historiquement, l'outil de détection employé a été le compteur Geiger, dont les premiers modèles transportables (de l'ordre de 25 kg...) sont apparus dans les années 1930. Le compteur Geiger est encore utilisé aujourd'hui, mais les mesures qui demandent plus de précision sont effectuées par des compteurs à scintillation ou des spectromètres. L'idée d'une prospection aérienne radiologique a été émise en 1943, par G.C. Ridland, géophysicien travaillant à Port Radium (Canada). C'est à présent la technique la plus employée pour la prospection initiale de l'uranium. L'extension du gisement est ensuite précisée par des moyens plus classiques : échantillonnages, puis forages prospectifs.

### Exploitation des gisements d'uranium

#### Méthodes d'exploitation

Les techniques d'exploitation des gisements d'uranium sont communément guidées par leurs localisations géographiques (infrastructures éloignées, ...), leurs caractéristiques géologiques (telles que roche encaissante/teneur/tonnage/structure/profondeur/perméabilité, ...) et des aspects économiques de rentabilité (marché de l'uranium, valeur ajoutée nette du projet minier, ...). Quatre principales méthodes sont utilisées pour exploiter ces gisements d'uranium : (1) mine à ciel ouvert, (2) travaux miniers souterrains, (3) lixiviation en tas et (4) lixiviation in-situ. L'uranium peut également être récupéré comme sous-produit avec d'autres métaux (Cu, Au par exemple) avec l'une de ses quatre méthodes.

#### Mine à ciel ouvert (MCO)

Une mine à ciel ouvert (open-pit en anglais) est une mine dont l'ensemble des matériaux recouvrant le gisement d'uranium est extrait. Elle est employée lorsque le minerai se trouve relativement proche de la surface. L'accès au minerai peut donc être long avec d'importants travaux de découverte de stériles miniers. Cette méthode est actuellement utilisée au Niger par la société SOMAÏR (figure 11a).

#### Mine souterraine ou travaux miniers souterrains (TMS)

Une mine souterraine comprend généralement un immense réseau de galeries et de puits permettant d'atteindre le gisement d'uranium. Une fois abattu, le minerai sera remonté à la surface au moyen de skips (puits), camions ou bandes transporteuses (descenderies) pour être acheminé vers l'usine de traitement des minerais.

À l'intérieur d'une mine souterraine, on trouve :

- une descenderie : une large galerie inclinée en spirale (ou rectiligne), liaison entre

le jour et le fond permettant l'entrée et la sortie du personnel, du matériel et l'évacuation du minerai. La descendrière fait également partie du circuit d'aérage de la mine, généralement comme voie d'entrée d'air ;

- des recoupes : galeries qui conduisent à la zone minéralisée ;
- des Puits : voie d'accès verticale reliant le jour et le fond, il permet d'assurer l'entrée et la sortie du personnel, du matériel et du minerai. Le puits principal fait également partie du circuit d'aérage de la mine, généralement comme puits d'entrée d'air ;
- des puits d'aérage : celui-ci sert à l'entrée ou à la sortie d'air indispensable à la ventilation de la mine (évacuation des fumées de tir, des gaz d'échappement, du radon...).

Plusieurs méthodes spécifiques de TMS ont été utilisées pour exploiter les gisements d'uranium selon leurs morphologies en amas, en filon ou en couche. Les plus communes sont : (1) chambre et piliers, (2) tranches montantes remblayées ou tranches descendantes sous dalles béton, (3) longues tailles avec soutènement. Des nouvelles méthodes spécifiques de TMS (raise boring, jet boring, ...) ont été développées au Canada pour accéder au minerai riche des gisements par CAMECO et Orano (figure 11b).

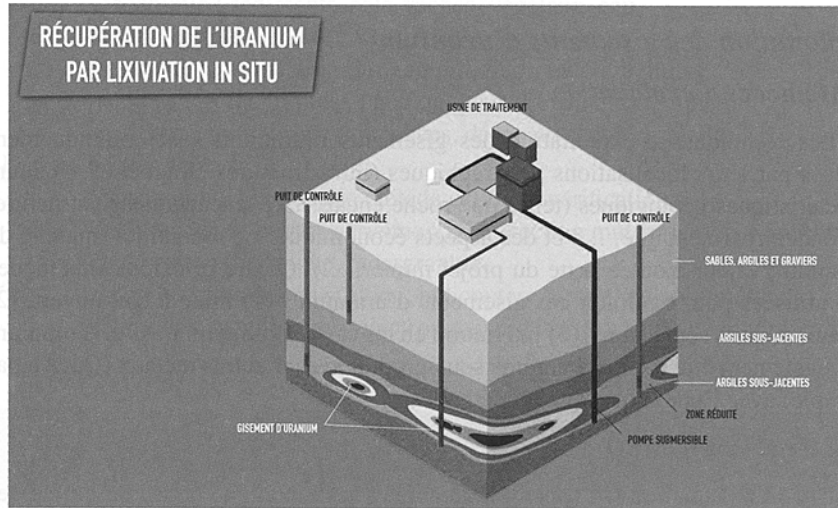


Fig. 9 Schéma de fonctionnement de la lixiviation in-situ (École des Mines de Paris).

### Récupération in-situ (In-situ Recovery, ISR)

La lixiviation in situ (ou ISL pour In Situ Leaching), aussi dénommée récupération in situ (ou ISR pour In Situ Recovery), est un procédé visant à dissoudre des métaux tels que l'uranium directement dans le gisement. A l'aide d'une série de puits injecteurs (figure 11d) et producteurs, une circulation de solution lixivante est

établie, permettant l'attaque du minerai. La solution est ensuite récupérée pour la phase de traitement.

Pour utiliser la lixiviation in situ, le gisement doit être suffisamment perméable pour permettre une bonne circulation de la solution lixivante. Typiquement, les minerais contenus dans des formations sédimentaires perméables telles que les grès ou les roches très fracturées sont potentiellement exploitables par ISR. De plus, les minerais doivent être confinés entre des couches relativement imperméables, qu'on appelle aquitards, afin de canaliser la solution lixivante dans la zone minéralisée. La figure 9 présente une configuration hydrogéologique fréquemment utilisée pour illustrer les conditions idéales d'une exploitation par ISR.

Historiquement, la lixiviation in situ fut développée au début des années 60 pour l'extraction d'uranium. Elle contribue depuis 2014 à plus de 50% de la production mondiale d'uranium, notamment au Kazakhstan, Ouzbékistan, Australie, Chine, Russie et USA (figure 10). Le principal avantage de cette technique est de récupérer des métaux comme l'uranium sans avoir recours aux techniques minières traditionnelles, qui impliquent forage, explosion, découverte ou couteuses infrastructures souterraines ni de procédés de traitement énergivores (concassage, broyage). Par conséquent, il n'y a qu'une faible empreinte en surface, aucune verse stérile ni de résidus de traitement (figure 11c).

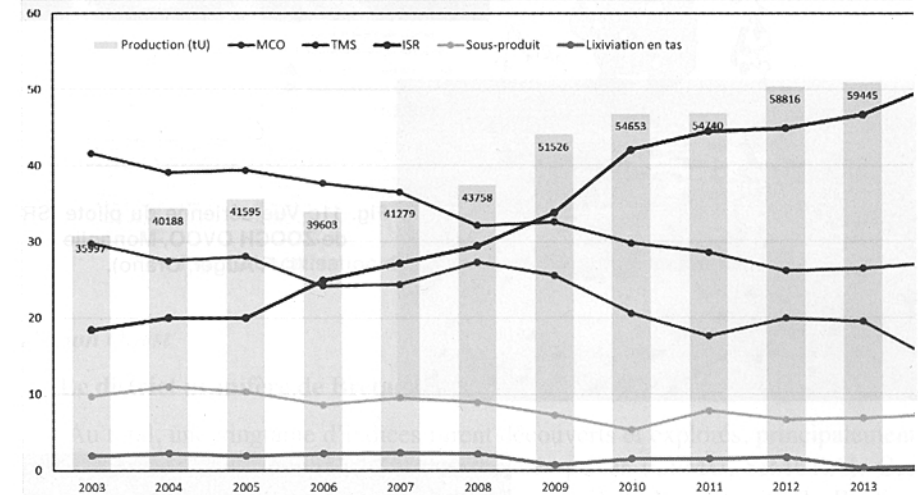


Fig. 10 Distribution (%) de la production mondiale par méthodes de productions 2003-2015 (AIEA, 2007, 2011, 2014, 2016).



Fig. 11a Mine à ciel ouvert de TAMOU (SOMAÏR Niger ; © R. Mathieu, Orano).

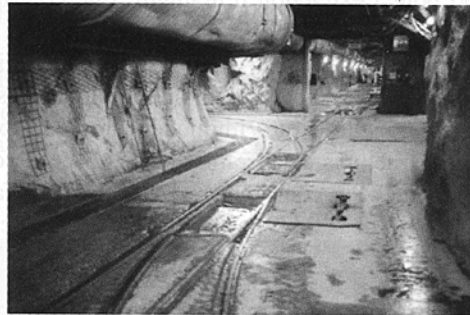


Fig. 11b Mine souterraine de CIGAR LAKE (Orano, Canada ; © R. Mathieu, Orano).

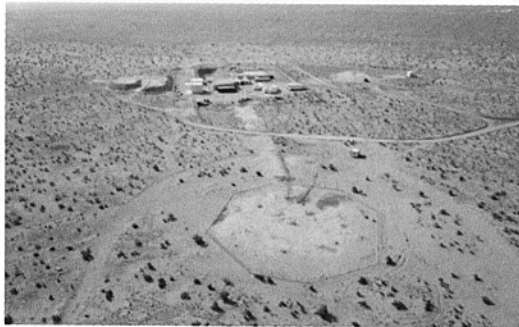


Fig. 11c Vue aérienne du pilote ISR de ZOOCH OVOO, Mongolie (© F. Auger, Orano).



Fig. 11d Puits injecteur du pilote ISR de SUD TORTKUDUK sur le gisement 17y (KATCO, Kazakhstan ; © R. Mathieu, Orano).

## L'uranium en France

Les minerais d'uranium français sont généralement à faible teneur : de 1 à 4 kg d'uranium par tonne, selon les gisements. Leur exploitation se fait en mines à ciel ouvert pour la partie superficielle des gisements et en mines souterraines pour la partie profonde.

Les gisements métropolitains peuvent être répartis en deux catégories :

- les gisements liés aux granites et à leur contact, ils sont majoritaires,
- les gisements sédimentaires liés au contact socle/couverture.

Les gisements de valeur économique significative, ayant donné lieu à des exploitations sont répartis en une dizaine de districts situés dans, en bordure des deux grandes unités granitiques Hercyniennes que sont les Massif armoricain et le Massif Central (figure 12).

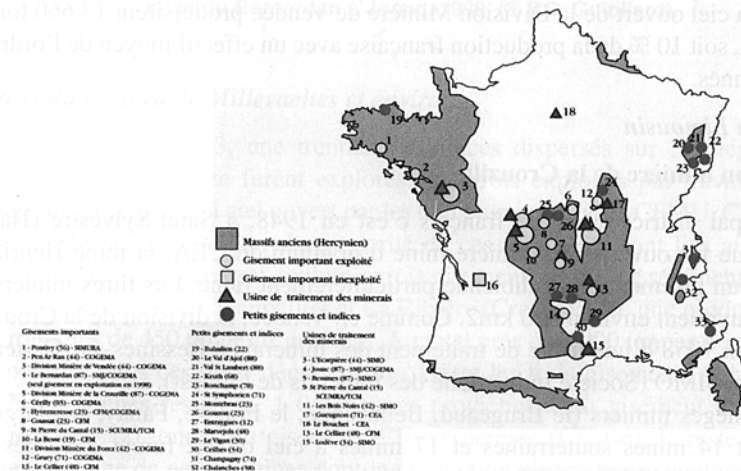


Fig. 12 Localisation des gisements d'uranium en France.

## Région Ouest

### Le district uranifère de Bretagne

Au total, une vingtaine d'indices furent découverts et explorés, principalement par des prospecteurs individuels et des sociétés privées (CFMU, SIMURA). Ces gisements sont situés pour l'essentiel dans le massif de leucogranite de Pontivy (Morbihan) dont la production totale est de l'ordre 1 120 tonnes d'uranium dont les deux tiers ont été produites par les quatre mines du Bonote (400 t), de Kerler (146 t), de Rosglas (114 t) et de Part-Mérien (72 t), le tiers restant étant produites par une quinzaine de petits sites aux productions très disparates souvent inférieures à 50 tonnes.

### Le district uranifère Vendéen

C'est l'un des quatre grands fiefs du CEA puis de COGEMA. La Division minière de Vendée couvre sur 700 km<sup>2</sup> une partie des départements de Vendée, de Loire-Atlantique, des Deux-Sèvres et du Maine-et-Loire, elle fut la première à

être équipée, dès 1957, d'une usine de traitement chimique des minerais (usine de l'Ecarpière). Les exploitations sont réparties en deux groupes d'inégale importance :

- le district de Vendée, avec ses sièges d'exploitation les plus anciennement découverts (1951 à 1952) de l'Ecarpière, de la Chapelle-Largeau, la Commanderie, les Herbiers, la Dorgissière, le Chardon et d'autres de moindre importance,
- le secteur Sud-Est Bretagne proche du leucogranite de Guérande. De découverte plus récente, une dizaine d'indices furent explorés par COGEMA dans les années 1970 - 1980, mais seule la mine de Pen Ar Ran à Piriac-sur-Mer, avec 602 tonnes d'uranium produites entre 1975 et 1989 représente un gisement significatif avec la particularité d'avoir été exploitée sous la mer.

Au mois de mai 1991, la fermeture de la mine du Chardon signait la fin de la Division minière de Vendée. En 40 ans d'existence, les 12 mines souterraines et les 31 mines à ciel ouvert de la Division Minière de Vendée produisirent 13 660 tonnes d'uranium, soit 10 % de la production française avec un effectif moyen de l'ordre de 500 personnes.

### *District du Limousin*

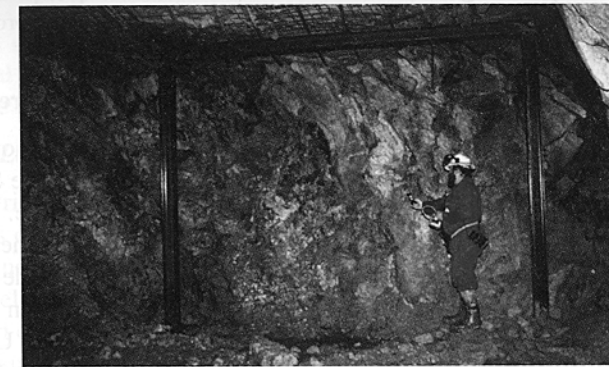
#### **Division minière de la Crouzille**

Principal district uranifère français c'est en 1948, à Saint-Sylvestre (Haute-Vienne) que fut ouverte la première mine d'uranium du CEA, la mine Henriette, située sur un gisement de pechblende particulièrement riche. Les titres miniers du secteur couvraient environ 300 km<sup>2</sup>. Comme en Vendée, la division de la Crouzille fut dotée en 1958 d'une usine de traitement des minerais à Bessines-sur-Gartempe gérée par la SIMO (Société Industrielle des minerais de l'Ouest).

Cinq sièges miniers (le Brugeaud, Bellezanne, le Fraisse, Fanay, et Margnac) regroupant 14 mines souterraines et 17 mines à ciel ouvert furent exploités par COGEMA entre 1948 et 1995 sur le territoire de la Haute Vienne. Avec 23 324 tonnes d'uranium, la Division Minière de la Crouzille a produit plus de 31 % de l'uranium extrait en France, avec des effectifs variant de 500 à 1000 mineurs et 200 personnes employées à l'usine SIMO.

#### **Concession de Mailhac-sur-Benaize**

Située dans le nord de la Haute-Vienne, le gisement du Bernardan, commune de Jouac (Haute-Vienne) et quatre autres gisements satellites furent découverts en 1970 par la Compagnie Minière de Dong-Trieu. Située au nord des concessions de la Division minière de la Crouzille, l'exploitation débuta en 1979 par une mine à ciel ouvert puis par mine souterraine. Une usine moderne fut construite sur le site du Bernardan. Le gisement s'avéra particulièrement riche (figure 13), d'une teneur de 7 kg/t supérieure à la moyenne des autres mines nationales (2 à 4 kg/t). Après avoir été rachetée par TOTAL Compagnie Minière (TCM), la mine du Bernardan et l'usine de Jouac furent acquises en 1993 par COGEMA, devenant ainsi la Société des Mines de Jouac (SMJ). L'exploitation se poursuivra jusqu'en mai 2001, dernière mine d'uranium française, elle aura produit 9 417 tonnes d'uranium dont 7 775 tonnes provenant des gisements de la concession de Mailhac-sur-Benaize.



**Fig. 13** Front de taille fortement minéralisé, chantier P14, mine du Bernardan à Jouac, 1999, (© P.C. Guiollard).

### *District du Plateau de Millevaches et environs*

Entre 1955 et 1993, une trentaine d'indices dispersés sur les départements de Creuse et de Corrèze furent explorés et parfois exploités par travaux miniers souterrains et en mines à ciel ouvert par les compagnies privées CFMU, CFM, Saint-Gobain, SMAC, SCUMRA. La majorité de ces gisements sont liés aux granites hercyniens du Massif central, toutefois trois gisements d'origine sédimentaire furent exploités à Gouzou, à Chaumaillet et La Ribière (Creuse) avec une production pour ces trois sites de 450 tonnes d'uranium. Au total près de 3 000 tonnes d'uranium ont été extraites dans ces deux départements. Outre les trois gisements sédimentaires, sur 2 550 tonnes restantes, 1 046 tonnes proviennent du gisement de La Besse (Corrèze) et 500 tonnes du gisement d'Hyverneresse (Creuse), le reste provenant d'une vingtaine de petites mines dont la production n'excède pas quelques dizaines de tonnes chacune.

### *District du Cantal*

#### **Gisement de Saint-Pierre**

Ce gisement d'origine sédimentaire, découvert en 1955 par la SCUMRA, fut exploité en mine à ciel ouvert à deux reprises de 1958 à 1964 puis de 1975 à 1984. C'est au cours de cette deuxième période que fut construite une usine de traitement des minerais. Au total sur les deux périodes d'activité, ce sont 1 305 tonnes d'uranium qui furent extraites de ce gisement.

### *District du Forez*

#### **Division minière de Lachaux (Puy-de-Dôme)**

Connu depuis 1925, les gisements du secteur de Lachaux furent, en 1946, le point de départ des exploitations minières du CEA, représentant un terrain d'expérimentation des méthodes d'exploitation et de traitement des minerais. Une usine de concentration située sur le site de Rophin fonctionna de 1952 à 1957. D'un intérêt économique limité, l'exploitation de ces gisements cessa en 1955 après la

découverte de l'important gisement des Bois-Noirs voisin de quelques dizaines de kilomètres. Au total c'est seulement 34 tonnes d'uranium qui furent produites par 7 petites mines souterraines ouvertes sur ce secteur.

#### **Division minière des Bois-Noirs à Saint-Priest- Laprugne (Loire)**

Le gisement des Bois-Noirs, également appelé gisement du Limouzat, fut découvert en 1951. Plusieurs indices localisés autour de la commune de Saint-Priest-Laprugne (Loire) mirent en évidence un district particulièrement riche. Exploité dès 1955 par le CEA puis par COGEMA le Limouzat fut un cas exceptionnel. Isolé, logé dans une grande structure faillée de 1,5 km de long sur 400 mètres de profondeur, il représente l'une des plus fortes concentrations d'uranium connue en France avec des corps minéralisés dépassant parfois les dix mètres de puissance. Une usine de traitement des minerais similaire à celles des divisions de Vendée et de La Crouzille fut construite sur le site. Au total, 7 000 tonnes d'uranium ont été extraites de ce seul gisement entre 1955 et 1980.

À noter la mise en exploitation de quelques chantiers « satellite » situés dans la région d'Ambert (Puy-de-Dôme) qui donnèrent lieu à l'ouverture de cinq mines à ciel ouvert dont la production fut traitée à l'usine des Bois Noirs. Environ 250 tonnes d'uranium furent produites par ces petits chantiers entre 1970 et 1979.

#### **District de Cérilly**

Situé dans le département de l'Allier, ce petit district uranifère d'origine sédimentaire fut mis en évidence et exploité par les mineurs de COGEMA. Sur les deux gisements de l'Ainasse et de Lombre, seul ce dernier fut exploité par mine à ciel ouvert entre 1973 et 1975, produisant 285 tonnes d'uranium.

#### **District du Morvan**

##### **Saint-Symphorien de Marmagne (Saône-et-Loire)**

Ce secteur présente avant tout un intérêt historique. C'est à Saint-Symphorien de Marmagne qu'en 1800, fut découvert un gisement de « phosphate d'urane » baptisé par la suite « autunite » en relation avec la région de l'Autunois où se situe ce gisement. C'est aussi sur ce site que fut ouverte par Hippolyte Marlot, la première exploitation de minerai radioactif, non pas pour l'uranium mais pour la production de radium. La mine des Riaux fonctionna de 1905 à 1910. En 1946, les chercheurs du CEA s'intéressèrent à ce secteur qui s'avéra très vite sans intérêt économique.

#### **District de Grury (Saône-et-Loire)**

Connu historiquement depuis les années 1900 par les travaux d'Hippolyte Marlot, le secteur suscita dès 1946 l'intérêt des prospecteurs du CEA, aboutissant à la découverte de plus de 80 indices principalement localisés autour des communes de Grury et de Luzy. Le secteur connut deux périodes d'activité : de 1946 à 1963, cinq mines souterraines (Bauzot, la Faye, les Brosses, les Jalerys et les Vernays) furent exploitées autour de Grury, constituant une division minière du CEA à part entière (Division Minière de Grury). Les minerais étaient envoyés pour traitement à l'usine CEA de Gueugnon (Saône-et-Loire).

Dans les années 1970, COGEMA reprit l'exploration de ces anciennes

exploitations et des nombreux indices de la région, y compris dans le secteur voisin de Château-Chinon (Nièvre). A cette seconde période correspond l'ouverture d'une quinzaine d'exploitations, majoritairement à ciel ouvert.

Au total 1 390 tonnes d'uranium furent produites dans les départements de la Nièvre et de Saône-et-Loire.

#### **District de Lozère**

Ce district fut mis en évidence en 1956 par les prospecteurs de CFMU. Ces découvertes débouchèrent dans un premier temps, à partir de 1958, sur l'ouverture de trois mines importantes exploitées à ciel ouvert et en mines souterraines, les mines du Cellier, du Villeret, et des Pierres Plantées. Dans un second temps, la mine à ciel ouvert des Bondons fut exploitée entre 1980 et 1989. Une importante usine de traitement fut construite sur le site du Cellier.

Au total 4 350 tonnes furent produites entre 1958 et 1989, dont 2 283 tonnes sortirent de la mine du Cellier.

#### **District du Lévezou**

Dès 1958, les prospecteurs de la SCUMRA découvrirent plusieurs indices situés dans le détroit de Rodez, près de Gages, Bertholène, Séverac-le-Château et Réquista (Aveyron).

Les premiers travaux débutèrent sur le gisement de Bertholène en 1977. Une mine souterraine et une mine à ciel ouvert exploitées par TOTAL Compagnie Minière entre 1979 et 1994, produisirent au total 750 tonnes d'uranium. Une installation de lixiviation des minerais fut installée sur le site permettant de fixer l'uranium sur des résines échangeuses d'ions. Les conteneurs de résines chargées étant ensuite expédiés vers l'usine de Jouac pour élution et finition jusqu'au diuranate de magnésie (yellow cake).

#### **District du Lodévois**

##### **Division minière de l'Hérault**

Ce district situé près de Lodève (Hérault) constitue le plus important gisement d'origine sédimentaire français. Les premiers indices furent découverts en 1957 par les prospecteurs du CEA et les gisements de Rabejac et de Mas d'Alary reconnus par travaux souterrains entre 1959 et 1963.

En 1966, un décret accorde au CEA la concession du Lodévois, d'une superficie de 63,5 km<sup>2</sup> mais ce n'est qu'en 1974 que sera envisagée la mise en exploitation des gisements du Lodévois. Après quelques travaux de reconnaissance, la division minière du Lodévois est créée et l'exploitation du gisement de Mas Lavayre démarre en 1978, suivi du gisement de Mas d'Alary. Au total, ce sont 11 mines à ciel ouvert et cinq mines souterraines approvisionnant en minerai l'usine construite en 1980 sur le site du Bosc (figure 14).

En 25 ans de production, de 1974 à 1999, la division minière de l'Hérault a produit 4 564 000 tonnes de minerai à une teneur 3,12 % contenant 12 880 tonnes d'uranium. UREKA, un centre interprétatif de la mine d'uranium et de conservation de la mémoire minière en Limousin. L'épopée française de l'uranium a donc commencé en Limousin en 1948 et l'aventure continue aujourd'hui encore, c'est

ce que UREKA, musée de la mine d'uranium unique en Europe (situé à Bessines sur Gartempe, Haute Vienne ; www.ureka.fr), préserve : durant plus de 60 ans, des hommes et des femmes ont œuvré jour après jour dans des conditions bien souvent extrêmes au cœur des mines sur lesquelles se trouve désormais le site d'UREKA. Pour la première fois un musée rend hommage à ces pionniers et à leur activité en retraçant de manière ludique et pédagogique l'histoire de l'exploitation de cette ressource naturelle contenue dans le sol limousin depuis des millions d'années. UREKA est à la fois le produit du territoire, de l'imagination et de la passion. À l'image de l'uranium que les hommes allaient extraire au fond des mines de Bessines, les initiateurs du projet se sont creusés les méninges de longues années pour faire éclore UREKA. En rassemblant des témoignages, des objets, des photos, des films, bref des tranches de vie à la fois uniques et universelles, c'est à ces pionniers et à leur travail qu'UREKA rend hommage.

UREKA a vocation d'être « un musée d'intérêt pédagogique » reconnu comme tel par l'Éducation Nationale ! grâce aux différents dossiers et documents pédagogiques associés à destination des enseignants et de leurs élèves, collégiens et lycéens, ....



Fig. 14 Site du Bosc (Hérault), Mines à ciel ouvert de Failles sud et Failles centrales, en arrière-plan l'usine de traitement des minerais (COGEMA, 1980).

## Bibliographie

- AIEA** – *Le phénomène d'Oklo* – Vienne, 650 p., 1975.
- AIEA** – *World distribution of uranium deposits* – 1996.
- AIEA** – *Uranium 2016 - Ressources, production et demande* – 2016.
- BAVOUX B. & GUIOLLARD P.C.** – *L'uranium de la Crouzille (Haute-Vienne)* – 1998.
- DAHLKAMP F.J.** – *Uranium ore deposits* – Springer-Verlag, 460 p., 1993.
- PAUCARD A.** – *La mine et les mineurs de l'uranium français, tome I, Les temps légendaires (1946-1950)* – 1996.
- PAUCARD A.** – *La mine et les mineurs de l'uranium français, tome II, Le temps des Conquêtes (1951-1958)* – 1994.
- PAUCARD A.** – *La mine et les mineurs de l'uranium français, tome III, Le temps des grandes aventures (1959-1973)* – 1996.
- PAUCARD A.** – *La mine et les mineurs de l'uranium français, tome IVa, d'une euphorie à l'autre : temps curieux, curieux temps (1974-1986 et après)*
- PAUCARD A.** – *La mine et les mineurs de l'uranium français, tome IVb, l'Outre-mer, les mineurs.*
- La Radioactivité et les Minéraux Uranifères Français* – Le règne minéral, Hors-série IV, 1998.
- ROUBAULT M.** – *Géologie de l'uranium* – Masson et Cie, Éditeurs, 463 p., 1958.
- ROUBAULT M.** – *Les minerais uranifères français et leurs gisements* – 4 volumes, Bibliothèque des sciences et techniques nucléaires, 1960, 1962, 1964, 1965.
- SCHUBNEL H.J.** – *Histoire naturelle de la radioactivité* – Museum National d'Histoire Naturelle, 1996.
- VALSARDIEU C.** – *Regards sur l'uranium, tome 1 : De l'uranium en terre à l'électricité* – Éditions ESKA, 1995.
- VALSARDIEU C.** – *Regards sur l'uranium, tome 2 : Exploration-Production* – Éditions ESKA, 1997.
- VALSARDIEU C. et CUNEY M.** – *Regards sur l'uranium, tome 3 : les concentrations naturelles d'uranium* – Éditions ESKA, 2000.