

gérer les ressources de la Nation et à éviter les gaspillages auxquels peut conduire l'application sans discernement du principe de précaution à des expositions dérisoires. Elle permettra aussi aux communicateurs chargés d'informer le public de disposer d'arguments très simples basés sur l'application du principe de naturalité bien exposé par B. Comby : "un changement provoqué par la main de l'homme dans les valeurs d'un paramètre d'environnement est notable ou non naturel s'il excède les variations naturelles de ce paramètre en fonction du lieu ou en fonction du temps dans un même lieu".

#### REFERENCES

- J. Pradel, P. Zettwoog, N. Dello, D. Beutier : *Le polonium 210, un repère naturel important en radioprotection*. Revue Radioprotection 2001, Vol. 36, n° 4 - p. 401-417.
- J. Pradel "La radioactivité naturelle". Radioprotection, Vol. 22, 1987, p. 291-308.
- Plaquettes Société Française de Radioprotection :
  - Becquerel et radioactivité d'origine naturelle.
  - La Radioactivité dans l'environnement.
- J. Pradel : *La Radioactivité c'est naturel*. Mines, Revue des Ingénieurs, n° 372, janvier 1988, p. 22-29.
- J. Pradel : *Comment utiliser les données concernant la radioactivité naturelle*. RGN 1993, n° 2, mars-avril, p. 102-108.
- J. Pradel - D. Beutier : *Le développement durable, oui mais quel horizon temporel ?* Revue des Ingénieurs, n° 381, juillet-août 1999, p. 19-20.
- R. Paulin : *Radionucléides Naturels*. Toxiques Nucléaires. P. Galle Masson, 2ème édition, p. 1-22.

#### A N N E X E

##### Evaluation des expositions aux rayonnements ionisants (rappel)

- Le Becquerel (Bq) est une unité utilisée pour évaluer l'intensité d'une source radioactive. Elle correspond à une quantité de matière qui subit une désintégration par seconde. 1 Bq correspond à 0,08 mg d'U238, 0,03 µg de Radium 226 et 0,4 millième de microgramme de Plutonium 239. Autrefois l'unité était le Curie qui vaut 37 milliards de Bq. Le changement d'unité a entraîné une augmentation terrifiante des résultats de mesure. Il y a des Bq partout tant cette unité est microscopique.
- Les expositions de l'homme : on distingue les expositions externes quand la source est à l'extérieur de l'organisme et les expositions internes quand la source est à l'intérieur.
- Les effets sur l'homme : pour évaluer l'importance des effets sur l'homme d'une exposition, on utilise une unité complexe qui fait intervenir la nature du rayonnement, l'organe exposé, l'âge de l'individu exposé : le Sievert (Sv).
- La limite proposée pour la population est de 1 mSv par an. Il s'agit d'une limite opérationnelle et non pas d'une limite sanitaire pour les expositions provenant de l'action de l'homme.
- Les radionucléides n'ont pas le même effet à activité égale. Pour 1 mSv/an il faut par exemple ingérer un certain nombre de Bq : 55 000 000 pour le Tritium, 22 000 pour le 238 Uranium, 4 500 pour le 232 Thorium, 4 000 pour le 239 Plutonium, 800 pour le 210 Polonium, 76 900 pour le 137 Césium.

Débat

Dossier

Ecoles

Associations

Intermines

Carnet

Adresses

### L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

## Les mines d'uranium à très haute teneur : défis et atouts



**Jean-Michel MARINO (P65)**

Directeur de la production d'uranium COGEMA

#### Jean-Michel MARINO

55 ans, Ingénieur Civil des Mines (P65), employé depuis 1968 dans les activités minières du CEA puis de COGEMA en France et à l'étranger (études et projets, directions techniques, directions de site) : Vendée, Hérault, Jouac, Imouraren, SOMAÏR, Cigar Lake. Nommé en janvier 1999 Coordonnateur France Afrique, puis en août 2000 Directeur de la Production d'Uranium au sein de la Business Unit Mines.

#### Georges Capus :

51 ans, diplômé de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (Hydrogéologie et Traitement des Eaux - 1974) et docteur ingénieur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (1979), a été employé chez COGEMA depuis 1980 à divers postes d'exploration minière en France et à l'étranger, avant de rejoindre, au Siège Social de COGEMA, les entités fonctionnelles en charge du suivi des marchés. Depuis 2000, responsable des analyses de marché mines, chimie et enrichissement de l'uranium au sein de la Direction Commerciale et du Développement International.



**Georges CAPUS**

**A** lors que dans le monde, la plupart des mines d'uranium extraient des minerais contenant quelques kilogrammes d'uranium par tonne, avec une moyenne pondérée à peine supérieure à un kilogramme par tonne, quelques gisements se distinguent nettement par les hautes teneurs des minerais qu'ils recèlent, parfois au dessus de cent kilogrammes d'uranium par tonne.

Dans le passé, quelques gisements avaient livré

des minerais d'uranium à haute teneur (plus de dix kilogrammes d'uranium par tonne de minerai); toutefois les quantités limitées, les teneurs moyennes réelles au front de taille, et les standards de radioprotection en vigueur à l'époque avaient conduit à ce que peu de problèmes d'exploitation ou de traitement ne soient à résoudre.

Le gisement de D à Cluff, au Canada, celui de Nabarlek, en Australie, puis la mise en production

de Key Lake au Canada, ont été des précurseurs de la production de minerais à teneur plus élevée que pour le reste des exploitations mondiales. Ils avaient nécessité l'adoption de mesures appropriées, simplifiées, il est vrai, par le fait du mode d'exploitation à ciel ouvert.

Mais c'est surtout suite à la découverte, au Canada, des gisements de Cigar Lake et McArthur River, que des questions techniques liées aux hautes teneurs sont pleinement apparues dans la conception des méthodes d'exploitation minières. Le démarrage de l'usine de McClean Lake en 1999 a réellement marqué l'intégration de ces contraintes dans la conception des usines de traitement, ainsi que le début de la production dans le contexte des hautes teneurs.

Le gisement de McArthur est entré en production peu après, tandis que les études préalables à la mise en production de Cigar Lake se terminent.

La contrepartie évidente des mesures particulières dues principalement à la forte radioactivité des minerais est un gain de prix de revient consécutif à la manipulation de moindres quantités.

### Les gisements à très haute teneur sont une exception (cf tableau 1)

De nombreux gisements d'uranium contiennent des zones qui peuvent présenter localement des teneurs très élevées à l'échelle d'un chantier minier, mais ces zones particulières limitées ne correspondent pas à la définition proposée ici.

Par gisements à très haute teneur, nous désignons plus spécifiquement des gisements constitués de corps minéralisés à teneur moyenne exceptionnellement élevée, soit, en moyenne, plus de 50 à 100 kg d'uranium à la tonne de minerai. Les gisements correspondant à cette définition connus de par le monde, et exploitables en souterrain (MS) ou à ciel ouvert (MCO), sont encore très peu nombreux. Ils sont tous situés au Canada, dans la Province de Saskatchewan et appartiennent au domaine géologique du Bassin Athabasca. Il s'agit de McArthur River (MS en exploitation), Cigar Lake (MS en projet avancé; tests industriels accomplis en vraie grandeur) et Midwest (MS en projet).

Ceci étant les gisements à haute teneur (plus de 10 kgU/t) présentent des caractéristiques

**Tableau 1 : les gisements d'uranium à haute teneur connus dans le monde**

Cisements (classés par teneur)	pays	teneur moyenne kgU/t	Tonnage (tU)	statut
Shinkolobwe	Zaïre	Moy. inférieure à 10	25 600	MS exploitée
JEB	Canada	11,2	2 323	MCO exploitée
McClean	Canada	20,6	4 800	Projet MS
Sue A	Canada	12,6	700	Projet MCO
Sue C	Canada	23,3	14 032	MCO exploitée
Collins Bay A	Canada	40,4	6 830	MCO exploitée
Collins Bay B	Canada	5,6	14 860	MCO exploitée
Collins Bay D	Canada	15,0	2 050	MCO exploitée
Eagle Point N.	Canada	12,6	17 210	MS exploitée
Eagle Point S.	Canada	10,8	7 110	MS en production
Cluff D	Canada	29,5	4 447	MCO exploitée
Cluff WDJ	Canada	21,5	4 790	MS en production
Key Lake (Deilmann)	Canada	20,9	53 760	MCO exploitée
Key Lake (Gartner)	Canada	15,9	28 780	MCO exploitée
Midwest	Canada	60,5	10 260	Projet MS
Cigar Lake	Canada	150,5	134 600	Projet MS
McArthur	Canada	195,5	192 620	MS en production
Nabarlek	Australie	18,6	11 500	MCO exploitée
Koongarra 1	Australie	12,4	7 770	Projet MCO

nécessitant des traitements spécifiques pour une part extrapolables aux gisements à très haute teneur, ce qui nous amène à les faire figurer dans la liste ci-après.

Il faut noter que les gisements à très haute teneur, et la plupart des gisements à haute teneur présentent une belle unité d'âge et de contexte géologique. Ils sont tous localisés au voisinage immédiat d'une discordance datée de 1 800 millions d'années entre un socle formé de terrains métamorphiques et une série gréseuse qui en constitue la couverture. Les mesures de datation effectuées sur leur minéralisations montrent moins d'homogénéité, s'étalant de 1 700 millions d'années jusqu'aux environs de 1 000 millions d'années. Les gisements canadiens semblent présenter d'assez nombreuses indications de première mise en place de la minéralisation il y a environ 1300 millions d'années.

### Teneur et rentabilité vont de pair

L'industrie extractive, et notamment l'exploitation des mines d'uranium comporte deux types de processus :

- le développement par sondages : dans l'hypothèse simplifiée d'un gisement massif, le volume à préciser est inversement proportionnel à la teneur, à ressource équivalente en métal;

- des opérations de transport : tir, marinage, roulage, extraction, mise à stock, puis reprise à stock; la tâche à accomplir y est proportionnelle au tonnage mobilisé, et donc varie également en raison inverse de la teneur à ressource équivalente en métal.

Le traitement des minerais d'uranium en usine de concentration comporte essentiellement quatre types de processus :

- des opérations de comminution : concassage et broyage, où l'énergie spécifique dépensée n'est pas dépendante de la teneur;
- la mise en solution de l'uranium : l'ordre de grandeur de la consommation en réactifs varie peu en fonction de la teneur;
- des opérations de transport : lavage des minerais et mise à stocks des résidus solides ; la tâche à accomplir est proportionnelle au tonnage entré dans l'installation;
- des opérations de finition : purification des jus uranifères (résines ou solvants), précipitation des concentrés d'uranium, séchage, emballage ; le travail à accomplir, les réactifs consommés y sont sensiblement proportionnels au tonnage d'uranium produit.

Ces considérations, rigoureusement exactes lorsqu'on s'intéresse à des variations modérées de teneur à l'intérieur d'un même gisement, restent des indications de tendance lourde pour l'exploitation et le traitement de minerais de gisements différents. Ainsi, le

prix de revient diminue fortement avec la teneur, les processus de finition étant seuls associés en première approche à des coûts proportionnels au tonnage d'uranium produit.

Des facteurs spécifiques apparaissent pour les minerais de haute teneur et engendrent des coûts supplémentaires. A titre d'exemple le renforcement de la radioprotection aussi bien à la mine qu'à l'usine, l'élimination des métaux lourds et de l'arsenic mis en solution en même temps que l'uranium. On verra que de véritables défis techniques sont relevés, permettant ainsi au bilan économique de rester néanmoins tout à fait positif par rapport aux minerais de teneur traditionnelle, en dépit des coûts additionnels liés aux mesures particulières nécessitées par les hautes teneurs.

### La radioactivité élevée impacte fortement les processus miniers

L'exploitation minière des gisements d'uranium ne diffère fondamentalement de celles des autres gisements métalliques que par la présence de quantités élevées d'éléments radioactifs dans les minerais, dont l'activité croît avec la teneur en uranium.

Toujours par référence aux autres gisements métalliques, la radioactivité des minerais révèle des aspects positifs. Elle est fort utile à la prospection et au développement des réserves. Elle permet notamment d'évaluer la teneur des minerais par corrélation avec des échantillons analysés chimiquement. Dans les gisements à forte teneur, quelques difficultés apparaissent pourtant du fait de la saturation des systèmes de comptage de la radioactivité. Il faut en outre tenir compte des variations de densité des minerais en fonction de la teneur pour l'évaluation des réserves, car d'importants effets d'atténuation de la radioactivité sont induits par la teneur.

La radioactivité des minerais présente aussi des aspects négatifs. En l'absence de mesures de protection appropriées, elle induit des risques radiologiques dont les conséquences instantanées restent certes faibles à inexistantes, y compris dans le cas des hautes teneurs, mais pouvant conduire au fil du temps à un détrimement cumulatif dont l'expression principale est le risque d'occurrence de cancer du poumon.

Les sources de risque sont classiquement liés au rayonnement et dans une moindre mesure émis par les parois minéralisées et le minerai transporté, ainsi qu'à l'inhalation



Photo 1 - Atelier d'abattage du minerai à très haute teneur par "gros trou" ("raise boring"); mine de McArthur River, Saskatchewan, Canada

des descendants émetteurs du radon ou des poussières fines entraînées dans les courants d'air aux points de morcellement des minerais (tirs, chute depuis un godet, un camion, ou une bande transporteuse).

En mine à ciel ouvert, les précautions à prendre pour l'extraction des minerais de haute teneur sont simples à mettre en oeuvre, essentiellement mettre le personnel à l'abri d'engins (foreuses, chargeuses,

Müller portatif, est opérée par le conducteur de pelle, grâce aux indications d'un compteur protégé inséré derrière la surface du godet.

Pour la mine souterraine, il n'y a pas de règle unique. L'expérience récente de Cluff Lake a montré qu'il était possible d'exploiter une mine filonienne souterraine à une teneur de plusieurs pour cent, tout en satisfaisant aux limites d'exposition radiologique les plus strictes, en adoptant des dispositions somme toutes assez simples: remplacement des outils de foration sur poussoir par des mini-jumbos spécialement conçus pour évoluer dans des chantiers étroits, projection de béton sur les parois minéralisées, y compris le front d'avancement pour la protection du personnel occupé à la foration et au tir, chargement incomplet des camions de transport de manière à éviter toute contamination par du mine-



Photo 2 - Galerie de congélation d'une zone en exploitation ; mine de McArthur River, Saskatchewan, Canada

camions) pourvus d'un filtrage de l'air et dans certains cas d'un blindage, si les épaisseurs standards de métaux de structure s'avèrent insuffisantes. Les bennes des camions ont même été fermées dans le cas de l'exploitation de Cluff D.

Une opération particulière, la sélection du minerai au chargement, traditionnellement guidée par un technicien échantillonneur muni sur le terrain d'un compteur Geiger-

raï tombé des bennes, suivi en temps réel des doses individuelles reçues lors des différentes tâches.

Lorsque cela est géométriquement praticable, on préfère avoir recours aux méthodes d'exploitation indirectes, dans lesquelles le dispositif d'abattage est commandé depuis la surface ou depuis une galerie hors minéralisation, avec trois modes de fracturation :



Photo 3 - Site de stockage des résidus de traitement sous tranche d'eau ; site JEB à McClean, Saskatchewan, Canada

- le tir, par longues mines verticales avec dégagement des produits vers une cheminée de jet en général forée par réalésage
- le forage de gros trous (en général par réalésage de trous-pilotes de plus faible diamètre), avec des variantes comme le réalésage montant entre deux niveaux (raise boring) actuellement utilisé sur la mine de McArthur River (voir photographie n°1), le réalésage montant borgne (box-hole boring) testé en 1991 sur l'essai minier de Cigar Lake, le réalésage descendant borgne (blind boring) testé en 1989 sur l'essai minier de Midwest, ou le creusement par puits adjacents à partir de la surface (blindshaft boring) actuellement en cours d'évaluation pour un projet minier
- l'abatage au jet d'eau avec des pressions pouvant atteindre 100 MPa, soit à partir de trous de forage descendants (borehole mining), procédé utilisé brièvement pour l'abatage d'un petit gisement superficiel à Cluff Lake, soit à partir de trous de forage montants (jet boring), système testé avec succès dans les essais miniers de Cigar Lake, et retenu pour la phase industrielle (méthode brevetée par C. Caleix et J.L. Narcy de COGEMA).

Les caractéristiques hydrogéologiques et géotechniques particulièrement sévères amènent dans certains cas à prévoir l'isolement de certains compartiments par une barrière de terrain congelé comme à McArthur River (voir photographie n°2), voire une congélation en masse du minerai comme à Cigar Lake. Ces techniques de protection fort coûteuses ne peuvent évidemment se justifier que par les économies apportées par ailleurs par l'effet teneur, et ne peuvent donc

être mises en oeuvre que sur de tels gisements.

Le minerai est recueilli selon les cas dans une trémie, dans le godet d'une chargeuse télécommandée, dans un système de séparation minerai /eau ou minerai/boue; certains systèmes prévoient le broyage au fond et la remontée au jour par pompage sous forme de pulpe.

Un remblai cimenté est en général mis en place immédiatement après creusement de chaque excavation élémentaire afin de limiter les risques d'éboulement et de salissage.

A noter, pour l'anecdote, que certains règlements prohibent le transport routier en camion-benne des minerais dont la teneur est supérieure à 2 pour cent. Quand mine et usine se trouvent éloignées, alors il faut soit diluer avec du stérile, soit broyer et transporter en conteneurs blindés.

### La concentration des minerais et la gestion des résidus de traitement sont adaptés

Les usines traitant des minerais de forte teneur présentent plusieurs particularités par rapport aux usines classiques, tout en bénéficiant des évolutions techniques récentes qui concourent à abaisser les doses collectives par le large développement de processus automatisés:

- comme dans toute installation moderne, les opérations sont surveillées et commandées à distance, avec l'assistance d'automates programmables; des interventions de prélèvement, de maintenance etc, sont cependant nécessaires et impliquent une large prise en compte de la radioprotection comme facteur dominant de conception à la construction, tant en matière d'isolation des rayonnements par des épaisseurs importantes de béton, que d'évacuation de l'air des zones pouvant engendrer des dégagements de radon; l'organisation proprement dite de la radioprotection, et particulièrement la dosimétrie, ne doit souffrir aucune faille, comme à la mine
- la partie amont (avant la finition) est un atelier relativement restreint par rapport à l'aval, car le tonnage de minerai à passer peut être 5 à 10 fois moindre à tonnage d'uranium produit comparable dans une

installation classique; la partie aval peut s'avérer d'une technologie relativement complexe compte tenu des impuretés, rarement valorisables comme les métaux lourds et l'arsenic

- les résidus solides sont fortement radioactifs et incluent le plus souvent des sulfures de ces impuretés: il est désormais obligatoire de les stocker sous le niveau de la nappe phréatique, afin d'éviter les phénomènes d'oxydation et la mise en solution des métaux; bien entendu, préalablement à la construction du stockage, on étudie l'impact à très long terme des phénomènes de migration. A titre d'exemple, il a fallu plusieurs années d'études et de procédures concernant le site de stockage pour obtenir l'autorisation de mise en service de l'usine de JEB à McClean; la mine attenante de JEB a été entièrement excavée avant tout commencement de traitement dans le but de servir de réceptacle des résidus de traitement de son propre minerai et aussi de celui des autres mines du secteur (voir photographie n°3).

### En conclusion

Les gisements d'uranium à haute teneur présentent des particularités pouvant relever du défi technologique; des solutions ont toujours été apportées, en général permises par le faible prix de revient résultant de la modicité des tonnages à traiter ou à manipuler, atout principal de ces gisements.

Il faut signaler aussi que certains de ces gisements, malgré une extension géométrique restreinte, peuvent contenir des tonnages importants d'uranium, au point d'être qualifiés de "monstres". Leur découverte a pu donner brutalement un sentiment d'abondance de ressources dans un contexte de marché déprimé, et contribuer à marginaliser l'économie des mines traditionnelles les plus coûteuses. La connaissance de ces gisements à très haute teneur a également permis de réorienter des stratégies d'exploration vers la recherche de gisements dits "de discordance", au contact grès/socle d'âge similaire à celui du bassin Athabasca où, pour le moment, tous ces "monstres" restent confinés.

Enfin, compte-tenu de la taille des gisements, chaque mise en exploitation est un événement majeur pour la production mondiale d'uranium. Par exemple la seule mine de McArthur contribue pour près de 20% à cette production, ce qui n'est pas sans conséquence sur la structure de l'offre de matières disponibles pour les clients électriciens.