

Rapport de stage

Arnaud COSTERMANS

Année universitaire : 2023-2024

Année d'études : Promotion 2024 (L3)
Licence de Science et Technologie
Institut Villebon - *Georges Charpak*



Orano Mining
125 Av. de Paris, 92320 Châtillon

Maître de stage : Youcef BENSEDIK

Enseignant référent : Cyril DAUPHIN

Stage effectué du 22/04 au 13/06 (7 semaines)

Remerciement

J'aimerais remercier Youcef BENSEDIK et Arnaud WUILBEAUX ainsi qu'Orano de m'avoir accueilli pendant ce stage.

Résumé

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Table des matières

Remerciement	1
1 Introduction	3
2 Introduction	3
2.1 Orano	3
2.2 Orano Mining	4
2.2.1 L'exploration	4
2.2.2 L'exploitation	4
2.2.3 Le traitement	4
2.2.4 L'après mine	4
2.3 Direction de la transformation digitale	5
3 Les mine d'uranium d'Orano	5
3.1 Sommaire	6
3.1.1 L'exploration	6
3.1.2 L'extraction	6
3.1.3 Classification des slabs	6
4 CanOp	6
4.1 Les sondes Gamma	7
4.2 Le GPS différentiel	7
4.3 L'électronique	7
5 L'analyse des données	7
6 Amélioration de la CanOp	10

6.1	Alléger le GPS	10
6.2	Alléger les sondes	10
Bibliography		11
A Technique d'extraction		12

Table des figures

1	Carte des activités d'Orano dans le monde	3
2	Apparence du yellow cake	5
3	Shema d'une sonde gamma NaI	7
4	Source d'erreur des GPS	8
5	Shema d'un systeme GPS differenciel	8
6	Corrélation entre la radiométrie et la teneur d'uranium	9

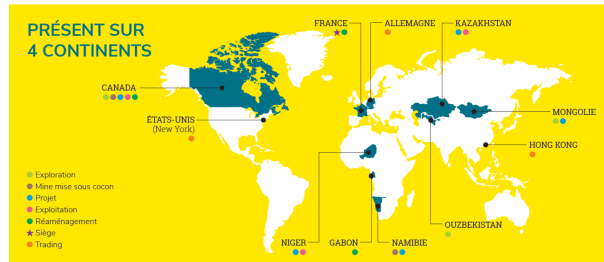


FIGURE 1 – Carte des activités d’Orano dans le monde, Source : Dossier d’information Orano 2020

1 Introduction

Pour mon stage de fin de licence, j’avais un stage de 7 semaines a effectué en entreprise ou en laboratoire en fonction de si l’on voulait s’insérer dans le monde professionnel ou académique. Pour ma part, car je souhait m’orienter vers une parcours

2 Introduction

Pour mon stage de fin de licence, j’avais un stage de 7 semaines a effectué en entreprise ou en laboratoire en fonction de si l’on voulait s’insérer dans le monde professionnel ou académique. Pour ma part, car je souhaite m’orienter vers un parcours professionnel, j’ai choisi de faire mon stage en entreprise à Orano.

2.1 Orano

Orano est un grand group français spécialisé dans le nucléaire. Elle possède 17 500 collaborateur dans 17 pays et avait un revenu de 4.8 M en 2023[1]. Elle est née en 2018 à la suite d’une restructuration d’Areva. Elle est présente dans plusieurs domaines du nucléaire, de l’extraction de l’uranium à la gestion des déchets nucléaires en passant par la production de combustible nucléaire. Ses différentes activité sont répartie dans plusieurs filiales :

Orano Support qui regroupe les activités de support du groupe

Orano Mining qui regroupe les activités d’extraction d’uranium

Orano Medical qui regroupe les activités de production de radioéléments pour la médecine nucléaire

Orano Batteries qui regroupe les activités de recyclage de batterie

Orano Dismantling qui regroupe les activités de démantèlement de centrale nucléaire

Orano Chimie-Enrichissement qui regroupe les activités de chimie et d’enrichissement de l’uranium

Ces filiales sont présente a l’international avec des mines d’uranium au Kazakhstan, au Canada et au Niger, de l’exploration ou des projet en Namibie, en Ouzbékistan et en Mongolie. La majorité des sites a l’étranger d’Orano sont des site d’Orano Mining due a la nature de ses activités. C’est dans cette dernière que j’ai effectuée mon stage.

2.2 Orano Mining

Orano mining est en charge de tout ce qui est relatif à l'extraction de l'uranium. Nous pouvons repartir ses activités en 4 grands domaines :

2.2.1 L'exploration

L'exploration est la première étape de l'extraction de l'uranium. Elle consiste à trouver des gisements d'uranium. Pour cela, Orano Mining utilise des méthodes géophysiques et géochimiques pour trouver des gisements d'uranium. Une fois un gisement trouvé, il faut l'exploiter.

2.2.2 L'exploitation

L'exploitation est la deuxième étape de l'extraction de l'uranium. Elle consiste à extraire l'uranium du sol. Pour cela, Orano Mining utilise diverses méthodes d'extraction en fonction de la nature du gisement. On peut citer :

L'extraction in situ qui consiste à injecter de l'acide dans le sol entre deux couches étanches pour dissoudre l'uranium et le remonter à la surface (voir [annexe A](#)). C'est le cas des mines de Muyunkum et Tortkuduk au Kazakhstan.

L'extraction par jetboring qui consiste à creuser un trou dans le sol et à injecter de l'eau sous pression pour remonter l'uranium à la surface (voir [annexe A](#)). C'est le cas de la mine Cigar Lake au Canada.

L'extraction par raisebore et boxbore qui consiste à forer par en dessous de gisement pour le laisser retomber dans la galerie principale (voir [annexe A](#)). C'est le cas de la mine McArthur River au Canada.

L'extraction à ciel ouvert qui consiste à creuser une fosse pour extraire l'uranium. C'est le cas de la mine de Somaïr au Niger et de Mclean Lake au Canada (production suspendue entre 2008 et 2025 suite à la chute du cours de l'uranium).

2.2.3 Le traitement

Le traitement est la dernière étape de l'extraction de l'uranium. Elle consiste à traiter le minerai pour en extraire l'uranium. Pour cela, Orano Mining utilise des méthodes de traitement chimique pour extraire l'uranium du minerai. Généralement, cette étape est faite avec une lixiviation de l'uranium par une solution concentrée acide, alcaline ou de peroxyde pour former ce que l'on appellera du "yellow cake" due à sa couleur et texture (voir [figure 2](#)). Le yellow cake est composé entre 70% et 90% d'oxyde d'uranium notamment d' U_3O_8 [2]. Une fois l'uranium extrait, il est envoyé à Orano Chimie-Enrichissement ou à d'autres partenaires pour être enrichi. En effet, l'uranium naturel est composé à 0,7% d'uranium 235 et à 99,3% d'uranium 238 [[empty citation](#)]. Pour être utilisé dans un réacteur, il faut que l'uranium 235 soit enrichi entre 3% à 5% d' U_{235} [3].

2.2.4 L'après mine

L'après mine désigne l'ensemble des actions de remédiation et de monitoring qui sont entrepris par Orano après qu'une mine ferme. En effet, une fois une mine fermée, il faut



FIGURE 2 – Apparence de yellow cake. Avec des méthode modernes, certain traitement preuve lui donner une apparence marron voir noir. Source : [Nuclear Regulatory Commission from US](#), Public domain, via Wikimedia Commons

la remettre en état pour éviter les risque de pollution. Pour cela, Orano Mining met en place des système de monitoring pour surveiller l'évolution de la mine et des action de remédiation pour remettre la mine en état. En France, Orano a la charge de 235 sur 247 des site minier d'uranium présent sur le territoire dont des sites qu'Orano n'a pas exploiter [4]. L'après-mine n'intervient pas qu'en France, mais aussi a l'étranger. Par exemple, au Canada, Orano a fini la remédiation de la mine de Cluff Lake (1979-2002) en 2013 et le site a été réouvert au public. En 2023, la gouvernement a été satisfait des actions d'Orano et les terres, on était rendu a l'état provincial [5].

2.3 Direction de la transformation digitale

Au sein de la mine est un petit service qui est en charge de la transformation digitale de la mine. Ce service est en charge de mettre en place divers outils digital pour améliorer les procédures de la mine. Pour cela, il travaille en collaboration avec les différents services de la mine pour comprendre leur besoin et mettre en place des outils qui répondent a leur besoin. C'est dans ce service que j'ai effectué mon stage.

3 Les mine d'uranium d'Orano

Orano possède plusieurs mines dans le monde avec différents manieurs d'extraction selon les conditions géologiques présentes et de la nature du gisement. C'est différent mine qui sont :

- Muyunkum et Tortkuduk au Kasakstan avec une recuperation in situ (voir [annexe A](#))
- McAthure River et Cigar Lake au Canada avec des methode de "jetboring" (voir [annexe A](#))
- Somaïr au Niger avec une mine a ceil Ouvert

3.1 Somaïr

3.1.1 L'exploration

Avant le debut de l'extraction, des geologue ont realiser des etude pour trouver d'éventuel gisement. S'ils soupçonne la presence d'uranium, les geologue vont realiser des campagne de sondage successive ¹. La maille de sondage sera affiner jusqu'à avoir des forage espacer de 25m.

3.1.2 L'extraction

Si la décision de passer en production est prise alors on va venir enlever toute la roche au-dessus du gisement (50 a 70 m à Somaïr) et l'on va affiner le sondage jusqu'à une maille de 5 m*5 m qui va permettre de modéliser au mieux la distribution d'uranium dans le sol. Enfin, la fosse sera divisée en carrés de 2,5 m de large sur 2,5 m de longueur sur 0,5 m de profondeur que l'on appellera "slab" par la suite. Pour extraire ces slabs, on enterre juste assez d'explosif pour fragiliser la roche et permettre qu'une pelle mécanique puisse extraire la slab pour la charge dans un camion.

3.1.3 Classification des slabs

Pour savoir comment traiter ces slabs après extraction, nous les catégorisons en 7 classes de M0 à en fonction de leur teneur en uranium. Au debut ces teneur était mesuré Les slabs M0 sont dites stériles, car elle contient tellement peu d'uranium que l'on ne souhaite pas les traiter. Les classes M1 et M2 subissent un traitement que l'on dit statique, car c'est slab sont empiler et l'on attend que l'uranium descend par gravité jusqu'un bas. Enfin les slabs de classe supérieure reçoivent un traitement dynamique où en fonction de leur classe elles seront dissoutes avec plus ou moins d'acide selon leurs classes. Il est donc important de bien classer les slabs, car sinon, soit on gaspille de l'acide ou alors il reste des l'uranium non extrait dans notre refus

Avant, pour classer une slab, un Aide Prospecteur (AP) utiliser un compteur Geiger Müller en se penchant pour obtenir des mesures a plusieurs points sur le slab. Il était donc pénible de se pencher en permanence et donc en 2018 a été lancer le projet CanOp pour réduire la pénibilité de la tâche.

4 CanOp

CanOp est le nom qui a été donné au projet de crée une sonde nouvelle génération pour la mine Somaïr au Niger. Cette sonde est composée de 3 pièces.

- 2 Sondes de rayonnement Gamma fournissent par la société Geovista
- une partie électronique qui inclue une batterie.
- Un GPS différentiel fourni par Ophelia

Un opérateur utilise cette sonde en connexion avec une tablette pour déterminer ou extraire du minerai.

1. Soit une carotte ou un forage dans lequel on abaisser un sonde gamma. Cela permet d'établir le gisement en 3D

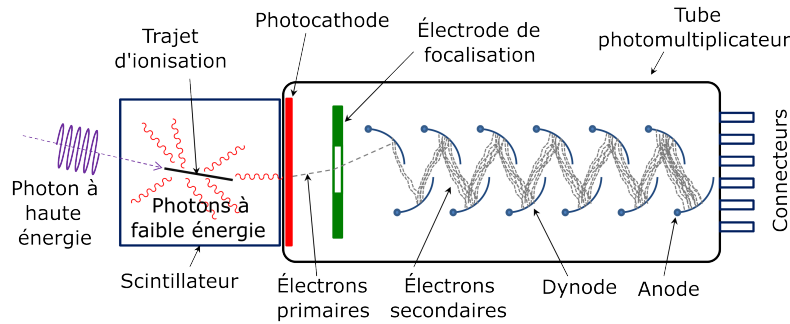


FIGURE 3 – Schéma d’une sonde gamma NaI. Source : [Qwerty123uiop](#), CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

4.1 Les sondes Gamma

Les sondes gamma de cet appareil proviennent de chez Ophelia et sont composées de deux parties.

Un crystal NaI Ce cristal a la propriété d’absorber les photons haut énergie des rayons gamma pour les réémettre comme des photons plus basse énergie (voir partie gauche de la [figure 3](#)) [6]

Un tube photomultiplicateur ce tube permet de convertir un photon en un photoélectron qui est ensuite multiplié par le tube pour être converti en signaux électriques. (Voir partie droite de la [figure 3](#)) [6]

Pour diverse raison, il y a deux sondes dans la partie basse de la CanOp. L’opérateur peut choisir avec quelle sonde il souhaite effectuer la mesure (bien que les valeurs des deux sondes sont enregistrées dans la base de données).

4.2 Le GPS différentiel

Pour que la CanOp puisse fonctionner correctement, il faut qu’elle soit située très précisément (± 10 cm sur les axes x et y et ± 1 cm sur les axes z) or un GPS classique n’arrive qu’à atteindre ± 3 m horizontalement et ± 5 m verticalement dus notamment aux perturbations atmosphériques que subissent les signaux.

Une des solutions possibles pour contourner ces problèmes est d’utiliser un GPS différentiel. Le principe de fonctionnement est simple, une station fixe à proximité de notre zone de mesure reçoit également les signaux GPS et en connaissant sa position précise peut calculer et transmettre les corrections nécessaires. [7]

4.3 L’électronique

5 L’analyse des données

Une des premières tâches que j’ai effectuées a été que recalculée à partir des données brutes récoltées sur chaque slab, la production mensuelle des différentes fosses de Somaïr. Pour cela, j’ai eu accès à la data-plateforme d’Orano qui est hébergé sur Dataiku.

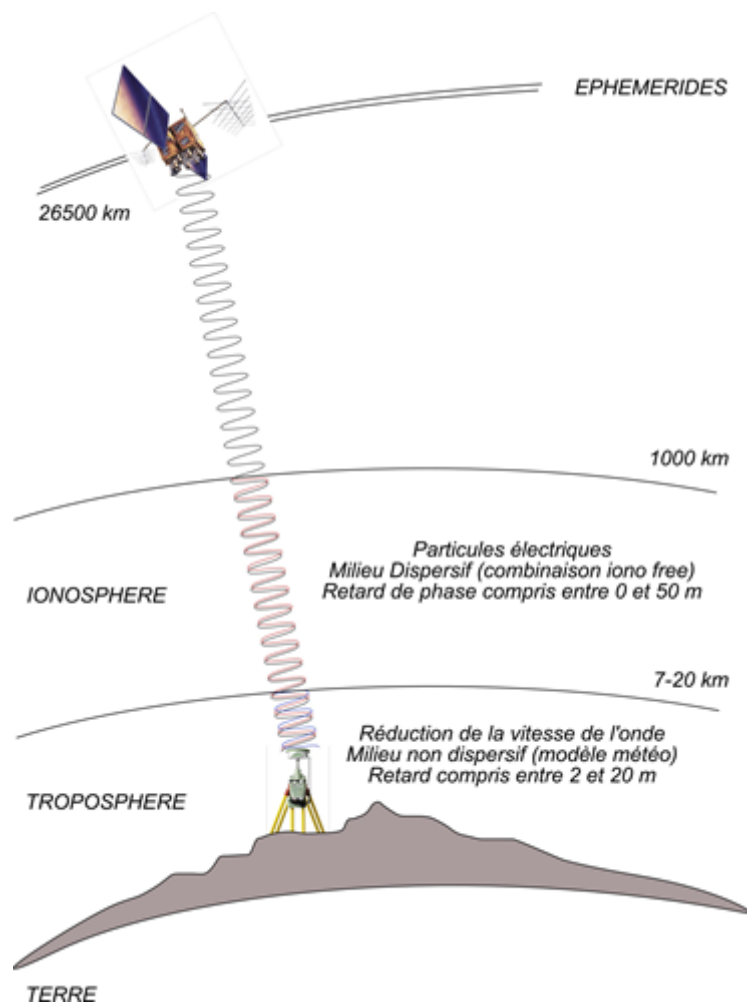


FIGURE 4 – Schéma présentant les sources d'erreur des GPS. Source : Orphéon

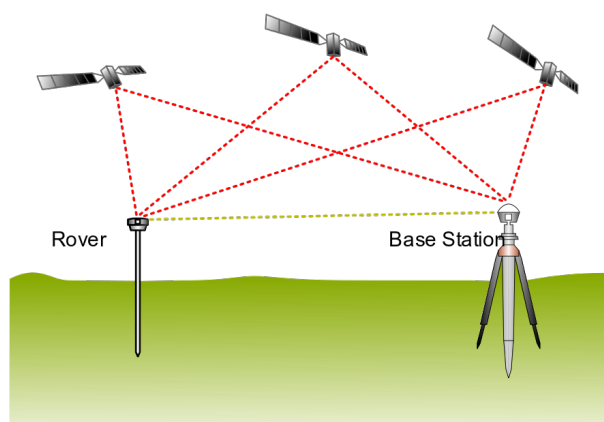


FIGURE 5 – Schéma d'un système GPS différentiel. Source : [TS Eriksson](#), CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

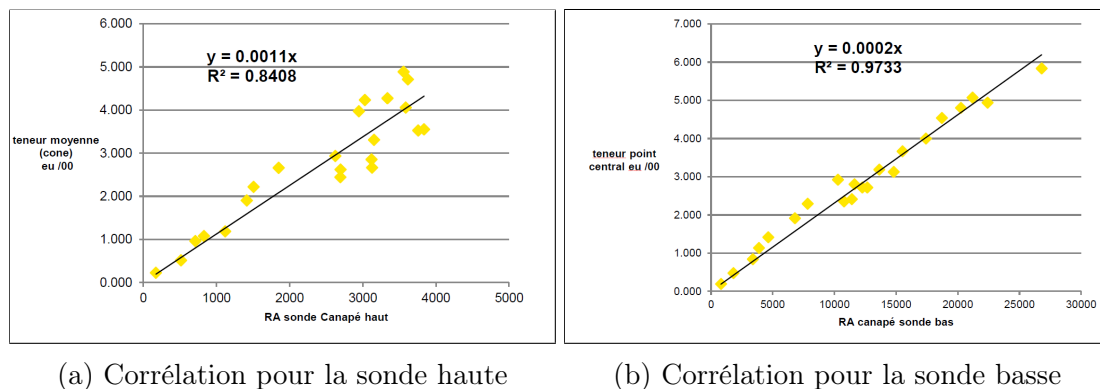


FIGURE 6 – Corrélation entre la radiométrie et la teneur d’uranium pour les sondes haute et basse, Source : Compte-rendu de mission Orano, Réf. : IDF-CR-001714

Dataiku est une plateforme conçue pour simplifier et démocratiser l’analyse de donnée. Pour cela, il n’y a même pas besoin d’écrire une ligne de code, car Dataiku a des recettes visuelles. Pour ceux qui souhaitent aller plus loin, il est possible d’écrire des recettes en python ou en R. Pour effectuer mes analyses, je me suis plutôt appuyé sur les recettes Python qui exploitent la librairie [Pandas](#) et [Numpy](#).

Les données en provenance de la CanOp ont d’abord besoin d’être nettoyées, car il y a parfois des problèmes de mesure, des bugs et l’opérateur a la possibilité de supprimer une mesure, mais cette fonctionnalité est implémentée de telle manière que la mesure est toujours présente, mais avec une valeur de -1. Il faut donc supprimer toutes ces valeurs. J’ai également eu une colonne ne contenant que des numéros, mais dont certains étaient saués comme des strings et d’autre comme des int.

J’ai ensuite pu établir les teneurs en uranium de chaque slab en utilisant la formule suivante¹ :

$$\text{Teneur en uranium} = \begin{cases} cps_{\text{sonde base}} \times 0.0002 \\ cps_{\text{sonde haut}} \times 0.0011 \end{cases}$$

Ces corrélations on était obtenu directement dans la fosse de Somaïr avec des mesures empiriques (voir [figure 6](#)).

À partir des teneurs en uranium, j’ai pu repartir les slabs et les chargements des différents camions dans leur différente classe (voir [??](#)). Une fois les chargements repartis, j’ai pu calculer la production mensuelle de chaque fosse en tenant compte de comment est fait le reporting de la production. En effet, la production est calculée du 26 du mois précédent au 25 du mois actuel sauf pour les mois de décembre/janvier et de juin/juillet ou la date limite est le 1er janvier/juillet à 5h. C’est là une autre subtilité qui est présente chaque mois auquel j’ai dû faire face, car la mine ne souhaite pas scinder en 2 la production de l’équipe de nuit (21h-5h).

1. Les cps sont des choc par seconde, soit le nombre de photon qui sont rentre en colition avec le crystal

6 Amélioration de la CanOp

Un des problèmes majeurs de la CanOp reste son poids relativement conséquent de 5,5 kg. Ce poids peut paraître léger, mais les opérateurs doivent porter les sondes à bout de bras pendant un shift de 8h sous le soleil avec une température qui monte régulièrement au-dessus de 40 °C. Déjà lors de sa conception, on a envisagé de changer l'armature d'aluminium pour de la fibre de carbone.

Une grosse partie de mon travail a donc été d'étudier et de proposer des solutions à ce problème. Assez rapidement, trois avenues d'amélioration sont apparues.

1. Alléger le GPS
2. alléger les sondes
3. répartir l'effort sur l'opérateur

6.1 Alléger le GPS

Actuellement, le GPS est une pièce monolithique fournie par Ophelia (voir [section 4.2](#)) qui calcule en interne la position corrigée de la sonde. Une solution pourrait être de fracturer les différentes parties du GPS et de délocaliser le calcul de la position et de sa correction appliquée depuis la tablette de l'opérateur en laissant l'antenne sur la sonde. D'autres solutions à partir de puce intégrées pourraient également mener à des économies de poids.

6.2 Alléger les sondes

Les sondes sur les CanOp sont des sondes en deux pièces composées d'un cristal scintillateur et d'un détecteur (ici un tube photomultiplicateur) (voir [section 4.1](#)). Ces sondes sont relativement lourdes et ne sont pas solidaires de ce qui pose des problèmes de déconnexions accidentel et d'infiltration de poussière/d'eau. J'ai donc cherché des sondes qui pourraient être plus étanches et/ou plus légères. En faisant c'est rechercher je suis tombé par accident sur des capteurs solides state SiPM qui pourrait remplacer les tubes photomultiplicateur. Ces composants sont devenus un remplacement viable de PMT que très récemment et n'était donc pas disponibles pour la V1 de la CanOp. C'est un composant présent de nombreux avantages :

- plus léger
- peu cher à fabriquer en masse (capitalisation sur les avancées faites en lithographie)
- moins chère
- basse tension (5 V vs 1000-2000 V pour les PMT) → simplification des électroniques

Ces avantages permettent de produire des sondes gamma pesant 25 g [[<empty citation>](#)] pour les plus petits comparé à environ 150 g [[<empty citation>](#)] pour les sondes classiques. De plus, ces sondes sont bien plus faciles à rendre étanche, car il n'y a plus besoin de séparer l'électronique du cristal.

Références

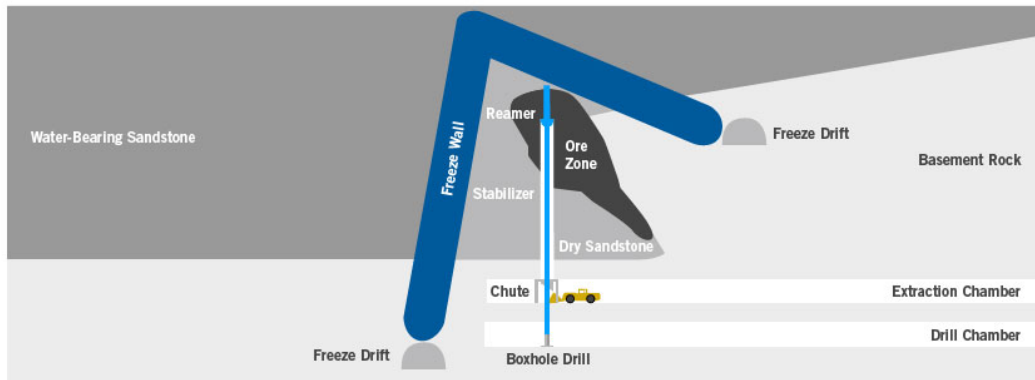
- [1] ORANO, company. *Rapport Annuel d'Activité 2023*. 5 avr. 2024. URL : <https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/groupe/publications->

- [reference/publication-groupe/orano_rapport-annuel-activite_2023_mel.pdf?sfvrsn=e1eb5bf8_10](#) (visité le 27/05/2024).
- [2] Donald M HAUSEN. « Characterizing and classifying uranium yellow cakes : a background ». In : *JOM* 50.12 (1998), p. 45-47. DOI : <https://doi.org/10.1007/s11837-998-0307-5>.
 - [3] John P CARTER et RA BORRELLI. « Integral molten salt reactor neutron physics study using Monte Carlo N-particle code ». In : *Nuclear Engineering and Design* 365 (2020), p. 110718. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110718>.
 - [4] ORANO, company. *Après-mines France – Orano Mining*. URL : <https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/de-l-exploration-au-recyclage/producteur-d-uranium-de-reference/apres-mines-france-orano-mining> (visité le 27/05/2024).
 - [5] ORANO, company. *Cluff Lake Project Concludes Mining Life Cycle*. 2023. URL : <https://www.orano.group/canada/en/news-resources/news/2023/may/cluff-lake-project-concludes-mining-life-cycle> (visité le 27/05/2024).
 - [6] MIRION. *Lab Experiment 1 : Gamma-Ray Detection with Scintillators*. 2023. URL : <https://www.mirion.com/discover/knowledge-hub/articles/education/gamma-ray-detection-with-scintillators-lab-experiment> (visité le 17/05/2024).
 - [7] GISGEOGRAPHY. *Lab Experiment 1 : Gamma-Ray Detection with Scintillators*. 2024. URL : <https://gisgeography.com/gps-accuracy-hdop-pdop-gdop-multipath/> (visité le 17/05/2024).

A Technique d'extraction

Source : [Cameco Mining Methods](#)

Boxhole Boring

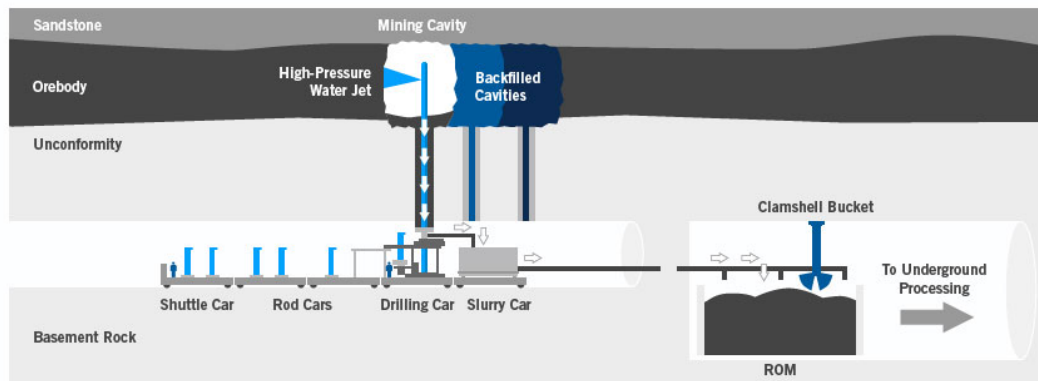


Boxhole boring is similar to the [Raisebore Mining](#), but the drilling machine is located below the mineralization, so development is not required above the mineralization. From a drill chamber in waste rock below the ore, we drill a series of overlapping holes up through the ore zone and collect the falling ore from a chute in the extraction chamber. This method is currently being used at a few mines around the world, but had not been used for uranium mining prior to testing at McArthur River.

Blasthole Stopping

Blasthole stoping involves establishing drill access above the mineralization and extraction access below the mineralization. The area between the upper and lower access levels (the stope) is then drilled off and blasted. The broken rock is collected on the lower level by line-of-sight remote-controlled scoop trams and transported to a grinding circuit. Once a stope is mined out, it is backfilled with concrete to maintain ground stability and allow the next stope in sequence to be mined. This mining method has been used extensively in the mining industry.

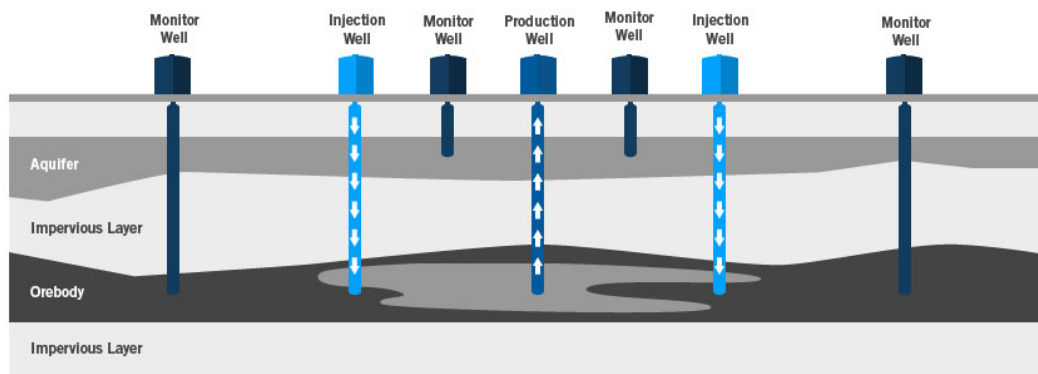
Jet Boring



Jet boring involves freezing the ore and surrounding rock in order to mine safely at Cigar Lake. Brine, chilled to -40°C , is piped underground to the deposit. The brine is circulated through large pipes, freezing the surrounding rock in about one year. When ready, a mining machine bores through the frozen rock to create the production tunnel. The jet boring system enters this tunnel and drills a pilot hole through the orebody. Then the jet boring nozzle is inserted in the pilot hole and the system begins boring through the rock using a high-pressure jet of water. Loose ore is flushed down the pilot hole. After a series of processes, ore is pumped to the surface in a slurry form.

[Watch video](#)

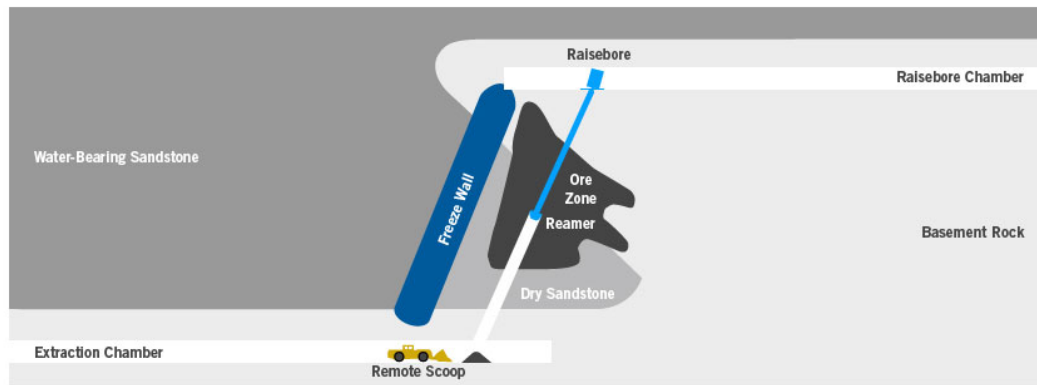
In Situ recovery



In situ recovery (ISR) methods are applied at our operations in the US and Kazakhstan to extract uranium contained in sandstone aquifers. In situ techniques involve circulation of solutions through ore-bearing formations to dissolve uranium and pump it to the surface for recovery. This approach results in minimal surface disturbance and produces no waste rock or mill tailings.

[Watch video](#)

Raisebore Mining



Raisebore mining is an innovative non-entry approach that we adapted to meet the unique challenges at McArthur River. From a raisebore chamber in waste rock above the ore, we drill a series of overlapping holes through the ore zone and collect the ore using remote-controlled scoop trams at the bottom of the raises. Once each raisebore hole is complete, we fill it with concrete. We have successfully used the raisebore mining method to extract more than 250 million lbs since we began mining in 1999.