

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 qui, bien que souvent occupée, a toujours trouvé le temps pour faire un point et m'expliquer quelque chose. J'aimerais également remercier Arnaud WUILBEAUX ainsi qu'Orano de m'avoir accueilli pendant ce stage et toutes les équipes qui m'ont expliqué le fonctionnement de certaines choses, de la procédure à des méthodes de production.

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
1.1 Orano	3
1.2 Orano Mining	4
1.2.1 L'exploration	4
1.2.2 L'exploitation	4
1.2.3 Le traitement	4
1.2.4 L'après-mine	5
1.3 Direction de la transformation digitale	5
1.4 Choix du Stage	5
1.5 Objectif du stage	5
2 Somaïr	6
2.1 L'exploration	6
2.2 L'extraction	6
2.3 Classification des slabs	7
3 CanOp	7
3.1 Les sondes Gamma	8
3.2 Le GPS différentiel	9
3.3 L'électronique	10

4	L'analyse des données	10
5	Amélioration de la CanOp	11
5.1	Alléger le GPS	12
5.2	Alléger les sondes	12
6	Les SiPM, un détecteur de lumière	12
7	Simulation	13
	Bibliography	15
A	Technique d'extraction	16

Table des figures

1	Carte des activités d'Orano dans le monde	3
2	Apparence du yellow cake	4
3	Photo d'AP utilisant un compteur Geiger Müller et la CanOp	7
4	Fonctionnement d'une sonde gamma	8
5	Erreur du GPS et fonctionnement GPS RTK	9
6	Corrélation entre la radiométrie et la teneur d'uranium	11
7	Composition d'un SiPM	13



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 souhaite m’orienter vers un parcours professionnel, j’ai choisi de faire mon stage en entreprise à Orano.

1.1 Orano

Orano est un grand groupe français spécialisé dans le cycle du nucléaire. Elle dispose 17 500 collaborateurs repartie 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. Ses différentes activités sont réparties dans plusieurs bimessus unit :

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 présentes à l'international avec des mines d'uranium au Kazakhstan, au Canada et au Niger, de l'exploration ou des projets en Namibie, en Ouzbékistan et en Mongolie. La majorité des sites à l'étranger d'Orano sont des sites d'Orano Mining due à la nature de ses activités. C'est dans cette dernière que j'ai effectué mon stage.

1.2 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 :

1.2.1 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.

1.2.2 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 étanche 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 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).

1.2.3 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 acidique, 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 de 70 % à 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



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

a 99,3 % d'uranium 238 avec une concentration moyenne de 2,7 ppm [3]. Pour être utilisé dans un réacteur, il faut que l'uranium 235 soit enrichi entre 3 % à 5 % d' U_{238} [4]

1.2.4 L'après-mine

L'après-mine désigne l'ensemble des actions de remédiations et de monitoring qui sont entrepris par Orano après qu'une mine ferme. En effet, une fois une mine fermée, il faut la remettre en état pour éviter les risques de pollution. Pour cela, Orano Mining met en place des systèmes de monitoring pour surveiller l'évolution de la mine et des actions de remédiations pour remettre la mine en état. En France, Orano a la charge de 235 sur 247 des sites miniers d'uranium présent sur le territoire dont des sites qu'Orano n'a pas exploité [5]. L'après-mine n'intervient pas qu'en France, mais aussi à l'étranger. Par exemple, au Canada, Orano a fini la remédiations de la mine de Cluff Lake (1979-2002) en 2013 et le site a été réouvert au public. En 2023, le gouvernement a été satisfait des actions d'Orano et les terres, on était rendu à l'état provincial [6].

1.3 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 digitaux pour accompagner

Nous cherchons également à exploiter les données que l'on récolte de nos diverses activités pour mieux comprendre comment on pourrait travailler à l'avenir et/ou est-ce qu'on est peu efficace.

1.4 Choix du Stage

J'envisage plus tard de devenir ingénieur en mechatronique et j'ai donc chercher un stage orienter en informatique, en electronique, en mecanique ou, idealement, un mix des trois. Le nucléaire est également un sujet qui m'intéresse et dont je comprends un certain nombre de chose. J'ai également la conviction que nous ne pourrons pas faire face à la catastrophe climatique qui s'annonce sans le nucléaire. J'ai donc postuler chez Orano pour mon stage de fin de licence.

1.5 Objectif du stage

Orano réalise souvent des projets via la direction de la R&D et l'innovation pour améliorer ses activités mais souvent il n'y a pas le temps pour revenir sur des projets déjà existants due à la taille limitée des équipes. J'ai donc été recruté pour essayer d'apporter des optimisations à un projet existant : La CanOp. Cette outil a été développé entre 2018 et 2022 et pèse environ 7kg. Pour le confondre des opérateurs, il faut utiliser cette outil il faut le réduire de taille.

2 Somaïr

Dans cette partie, nous allons tout particulièrement nous intéresser au fonctionnement de Somaïr, la mine à ciel ouvert d'Orano au Niger, car c'est là qu'est déployé l'outil CanOp et qui me faut comprendre le fonctionnement pour donner des suggestions cohérentes.

2.1 L'exploration

Le cycle de vie de la mine commence d'abord par trouver un gisement exploitable. Le service Geoscience de la mine en est responsable. Il y a une petite équipe d'expert qui en analysant les données géologiques et géopolitique vont déterminer où on peut mener un projet d'exploitation. Cela peut être une extension sur un gisement connu. On va ensuite enregistrer des "claims" auprès du gouvernement local pour avoir le droit d'explorer le sous-sol. Un projet d'exploration peut prendre 2 formes :

L'exploration "grass roots" Dans ce type d'exploration, nous avons aucune information sur la zone et il faut donc établir une carte géologique et mener un raisonnement sur quel processus géologique aurait pu concentrer l'uranium à un endroit donné. Nous pouvons ensuite faire des forages¹ pour vérifier nos hypothèses.

L'exploration "brown fields" Comme cela fait de nombreuses années que l'on exploite de l'uranium, certaines zones sont déjà eu des forages ou sont à proximité de zones exploitées. On va donc reprendre les données brutes relatives à la zone et chercher quelles assumptions ont été faites par le passé et si les personnes précédentes ont négligé quelque chose.

L'étape d'exploration est complexe car plus un gisement est concentré alors plus il aura tendance à être petit et donc plus il est difficile à trouver.

Une fois le gisement trouvé, on va multiplier les forages pour comprendre la forme et la répartition du gisement. Une fois que l'on a atteint un degré de confiance suffisant, le gisement est dit "ressource" et on peut alors passer à l'étape d'extraction.

2.2 L'extraction

A Somaïr, la profondeur du gisement, sa forme, la géographie du site et la teneur ont fait que la méthode d'extraction la plus rentable est une mine à ciel ouvert.

On commence d'abord par découvrir le gisement, c'est à dire d'enlever les 50 à 70m de roche au-dessus du gisement. Cette roche sera utilisée pour reboucher la mine quand elle arrivera en fin de vie.

L'extraction de l'uranium se fait par "tir". Un tir est une explosion contrôlée qui va briser la roche en morceaux plus petits. On délimite une zone de 50*50*6m dans laquelle on perce des trous tous les 5m. On utilise d'abord ces trous pour faire une mesure de radiométrie qui nous permettra d'établir un plan de tri avant de les remplir d'explosifs. Une fois les explosifs détonés, un Aide Prospecteur (AP) va mesurer la teneur en uranium de chaque slab² pour les classer en fonction de leur teneur en uranium.

1. Comme l'uranium est radioactif, nous pouvons approximer la présence de radioactivité à la présence d'uranium

2. Un slab est un morceau de roche de 2.5*2.5*0.5m. C'est l'unité de base de la mine



(a) Photo d'un opérateur utilisant un compteur Geiger Müller pour mesurer la teneur en uranium d'un slab



(b) Photo d'un opérateur utilisant la CanOp pour mesurer la teneur en uranium d'un slab. Il porte une tablette pour voir les mesures et sa position en temps réel

FIGURE 3 – Photo d'AP utilisant un compteur Geiger Müller et la CanOp

2.3 Classification des slabs

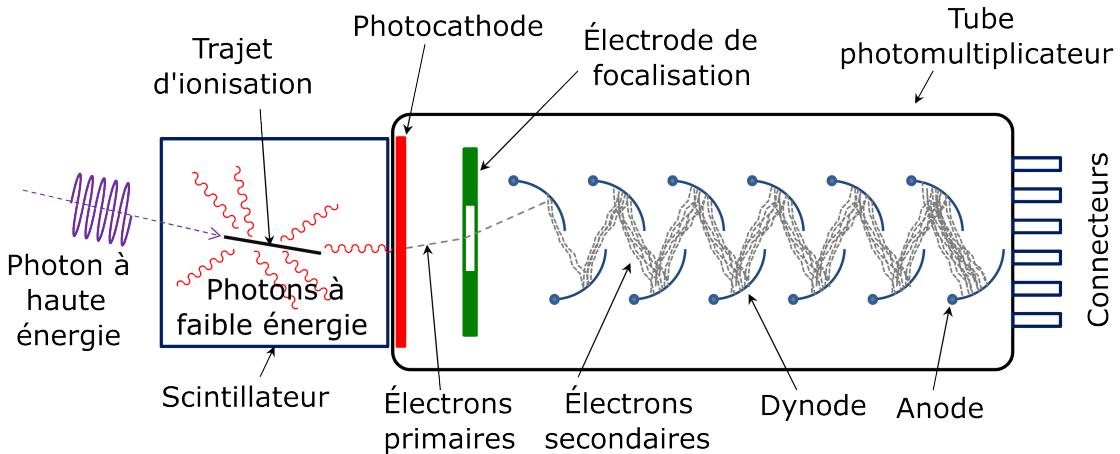
Pour savoir comment traiter ces slabs après extraction, nous les catégorisons en 7 classes de M0 à M6 en fonction de leur teneur en uranium. Les slabs M0 sont dites stériles, car elles contiennent tellement peu d'uranium que l'on ne souhaite pas les traiter. Les classes M1 et M2 subissent un traitement statique, car ces slabs sont empilés et l'on attend que l'uranium descend par gravité jusqu'en 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) utilisait un compteur Geiger Müller en se penchant pour obtenir des mesures à plusieurs points sur le slab. Il était donc pénible de se pencher en permanence et donc en 2018 a été lancé le projet CanOp pour réduire la pénibilité de la tâche et optimiser le tri du minerai.

3 CanOp

CanOp est le nom qui a été donné au projet de créer un équipement nouvelle génération pour la mine Somaïr au Niger. Cette sonde est composée de 3 éléments majeurs.

- 2 sondes de rayonnement Gamma fournies par la société Geovista
- une partie électronique qui inclut l'alimentation par batterie.
- Un GPS différentiel fourni par Ophelia

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



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



(b) Photo d'un cristal NaI doper au thallium. Dimension : diamètre 28*50 mm



(c) Photo d'un tube photomultiplicateur. Noter la fêlure à gauche de l'étiquette. Dimension : diamètre 29*114 mm

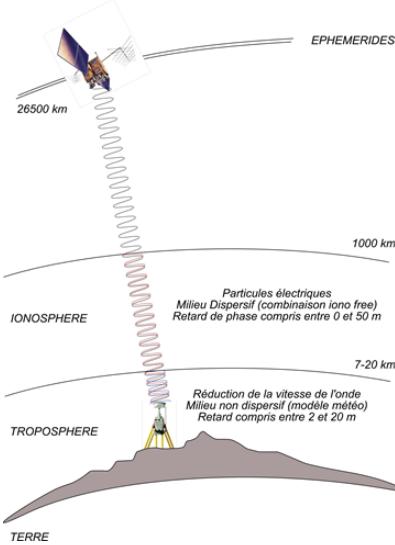
FIGURE 4 – Fonctionnement d'une sonde gamma

3.1 Les sondes Gamma

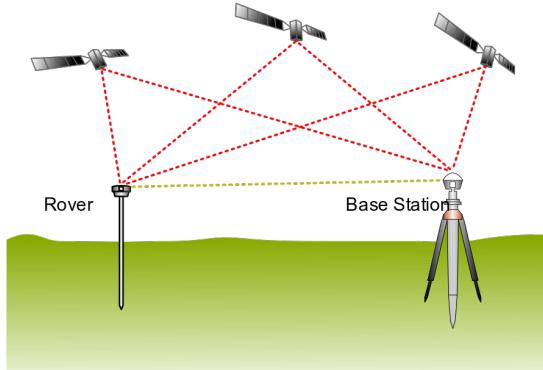
Les sondes gamma de cet appareil proviennent de chez Geovista et sont composées de deux parties.

Un cristal NaI(Th) C'est un cristal formé de sodium et d'iodure avec quelque atome de thallium répartie dans sa structure cristalline. Quand un photon vient frapper un atome du cristal il va devenir ionisé due à la grande énergie du photon. En se désexcitant, les atomes doivent repasser par des niveaux d'énergie et donc l'énergie qu'il dissipe à travers une émission de photon doit avoir une énergie précis qui se traduit par une longueur d'onde dans le visible. Nous avons donc un outil capable de transformer un rayonnement à haute énergie en quelque chose avec moins d'énergie que nous savons mesurer. (voir partie gauche de la figure 4a et 4b) [7]

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. Pour cela quand un photon vient du cristal NaI il impacte une photocathode qui éjecte un électron due à l'effet photoélectrique. Les électrons résultants sont ensuite accélérés vers le premier dynode car elle a un potentiel de ~ 100 V. Comme



(a) Schéma présentant les sources d'erreur des GPS. Source : Orphéon



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

FIGURE 5 – Erreur du GPS et fonctionnement GPS RTK

il accélère, il gagne de l'énergie et quand il frappe la dynode, elle va relâcher plusieurs électrons de plus basse énergie. Ces photons vont ensuite être accélérés par le prochain échelon qui est lui aussi tenu à un potentiel de ~ 100 V par rapport à l'étape d'avant. Si chaque échelon multiplie par 4 et qu'il y a 12 étapes, notre gain serait de $4^{12} \approx 10^7$. L'utilisation d'un PMT implique d'avoir un générateur haut tension car le photocathode sera maintenu à ~ -1200 V, il faut une atmosphère protectrice ou que le vide soit fait dans le tube et qu'il soit protégé de champs magnétiques car il pourrait dévier les électrons des dynodes et ainsi réduire le gain du tube. (Voir partie droite de la [figures 4a et 4c](#)) [8]

À la demande du client (Somaïr), une sonde basse a été incluse dans le projet en plus de la sonde haute prévue initialement pour permettre de faire des mesures aux niveaux du sol comme elle était faite avant (voir [section 2.2](#) et [figure 3a](#)). Les études internes montrent que les mesures les plus fiables sont faites à partir de la sonde haute donc la décision a été prise d'inclure les deux. À l'heure actuelle, selon les données enregistrées par la sonde, 68,5 % des mesures sont faites à partir de la sonde haute et 29 % à partir de la sonde basse. Les autres mesures sont faites avec une combinaison des deux.

3.2 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 [9] 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 peuvent calculer et transmettre les corrections nécessaires. [10]

3.3 L'électronique

L'électronique de la CanOp est ce qui permet à tout de fonctionner ensemble. Cette électronique est composé de deux PCB :

- Un PCB pour la batterie et le bouton poussoir
- Un PCB pour le GPS, les sondes et la communication bluetooth avec la tablette

L'opérateur interagit avec la sonde grâce à un bouton poussoir qui peut lui donner du feed back sur l'état de la sonde à travers deux LED intégrées au bouton. Les données issues des sondes sont juste des pulses de courant que le second PCB convertit en signal numérique. C'est donc ensuite d'agréger avec les données du GPS qui sont transmises via une connexion RS-232. Les données sont ensuite renvoyées par ce bus au module du GPS qui contient le module bluetooth qui permet de communiquer avec la tablette. Le GPS est connecté avec une connecteur à 7 broches qui est multifonctionnel. Si l'on débranche le GPS, on peut utiliser ce connecteur pour charger la batterie interne de la sonde. Il existe également un dongle bluetooth qui peut si connecter pour permettre l'interfaçage avec la sonde si le module GPS est indisponible. Les deux PCB sont contenus dans leur moitié de la sonde et sont entreconnectés grâce à un connecteur à 7 broches. Par mesure de sécurité, le fil positif de la batterie fait un aller-retour sur le connecteur entre les deux parties de la sonde pour que l'alimentation soit automatiquement coupée si on sépare les deux parties de la sonde.

4 L'analyse des données

Une des premières tâches que j'ai effectuées a été de recalculer 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 hébergée sur Dataiku.

Dataiku est une plateforme conçue pour simplifier et démocratiser l'analyse de données. 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 bibliothèque [Pandas](#) et [Numpy](#).

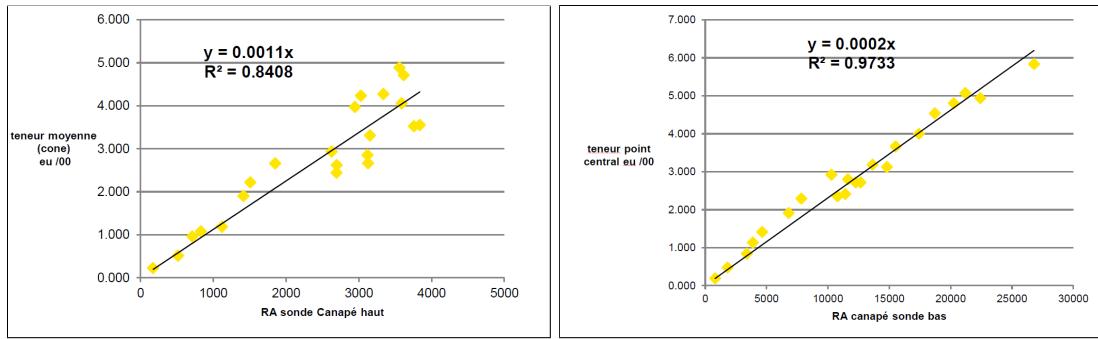
Les données en provenance de la CanOp ont d'abord besoin d'être nettoyées, car il y a parfois des problèmes de mesure, des bugs et l'opérateur a la possibilité de supprimer une mesure, mais cette fonctionnalité est implémentée de telle manière que la mesure est toujours présente, mais avec une valeur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

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

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

Ces corrélations ont été obtenues directement dans la fosse de Somaïr avec des mesures empiriques (voir [figure 6](#)).

1. Les cps sont des clics par seconde, soit le nombre de photons qui sont entrés en collision avec le cristal



(a) Corrélation pour la sonde haute

(b) Corrélation pour la sonde basse

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

À partir des teneurs en uranium, j’ai pu repartir les slabs et les chargements des différents camions dans leur différente classe (voir [section 2.3](#)). 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 où 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).

Une fois que j’ai constituer la table des donnée mensualiser il vallait ensuite la repre-senter et la comparer qu donnée fournit de production d’uranium a la sortie de l’usine de traitement. Pour cela, j’ai decouvert un autre outil tres utilisere a Orano : PowerBI. PowerBi est un outil de la suite Microsoft 365 qui permet de faire des graphiques et des tableaux de bord a partir de tableau de donnée. Cette outil est particulierment interesant pour plusieurs raison : il est tres facile de crée des graphe utile rapidement, il est pos-sible de faire des graphique dynamique, c’est a dire qui se mette a jour quand les donnée change. Les donnée peuvent aussi etre mis a jour automatiquement a partir d’une source externe. On peut donc crée des rapport sur la production mensuel d’uranium de maniere totalement automatiser et qui se mette a jour tout seul.

5 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 doive 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 avez envisagée de changer l’armature d’aluminium pour de la fibre de carbone.

Une grosse partie de mon travail a donc était 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. repartir l’effort sur l’opérateur

5.1 Alléger le GPS

Actuellement, le GPS est une pièce monolithique fournie par Ophelia (voir [section 3.2](#)) 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 a appliqué 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.

5.2 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 3.1](#)). 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 première version de la CanOp. Ces composants présentent de nombreux avantages :

- plus léger
- peu cher à fabriquer en masse (capitalisation sur les avancées faites en lithographie)
- basse tension (5 V vs 1000-2000 V pour les PMT) → simplification des électroniques
- Plus robuste (voir la fêture sur la [figure 4c](#))

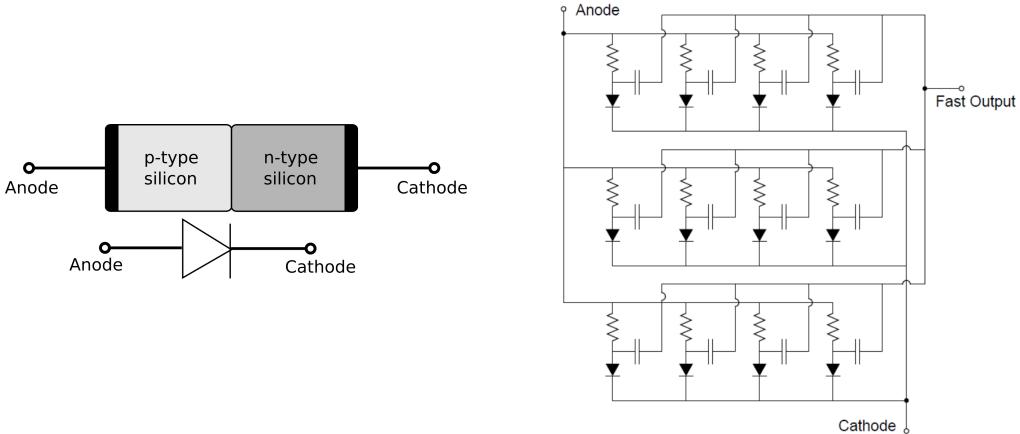
Ces avantages permettent de produire des sondes gamma pesant 25 g [[<empty citation>](#)] pour les plus petits comparer à environ 150 g [[<empty citation>](#)] pour les sondes classiques. De plus, ces sondes sont bien plus faciles à rendre étanche, car il n'y a plus besoin de séparer l'électronique du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

6 Les SiPM, un détecteur de lumière

Au plus simple, un SiPM est un composant électronique qui permet de détecter de la lumière.

Un SiPM est une puce de silicium qui contrairement au processeur qui sont composés de transistors, est composé d'une multitude de photodiodes. Une photodiode est un composant électronique qui permet de convertir de la lumière en courant électrique. C'est notamment ce qui est à utiliser dans les cellules photovoltaïques des panneaux solaires. Ici, les photodiodes vont plutôt être optimisées pour détecter des photons que pour générer de l'électricité.

En temps normal, une jonction p-n est un assemblage de deux matériaux semi-conducteurs qui agisse comme une diode (voir [figure 7a](#)). En choisissant judicieusement ses matériaux et en lui appliquant une tension dans son sens conventionnelle, on peut obtenir l'émission de lumière. C'est le principe de la LED. En revanche, si l'on applique une tension dans le sens inverse alors le courant ne peut plus circuler, car c'est une diode. Quand un photon d'une énergie suffisante vient frapper la jonction, il va libérer un élec-



(a) Schéma montrant l'équivalence entre une jonction P-N et une diode. Source : [Raffamaiden, CC BY-SA 3.0](#), via Wikimedia Commons

(b) Schéma d'un SiPM. Les diodes sont des diodes photoavalanche. On ne représente pas tous les modules. Source : [An Intro to SiPM, SensL](#)

FIGURE 7 – Composition d'un SiPM

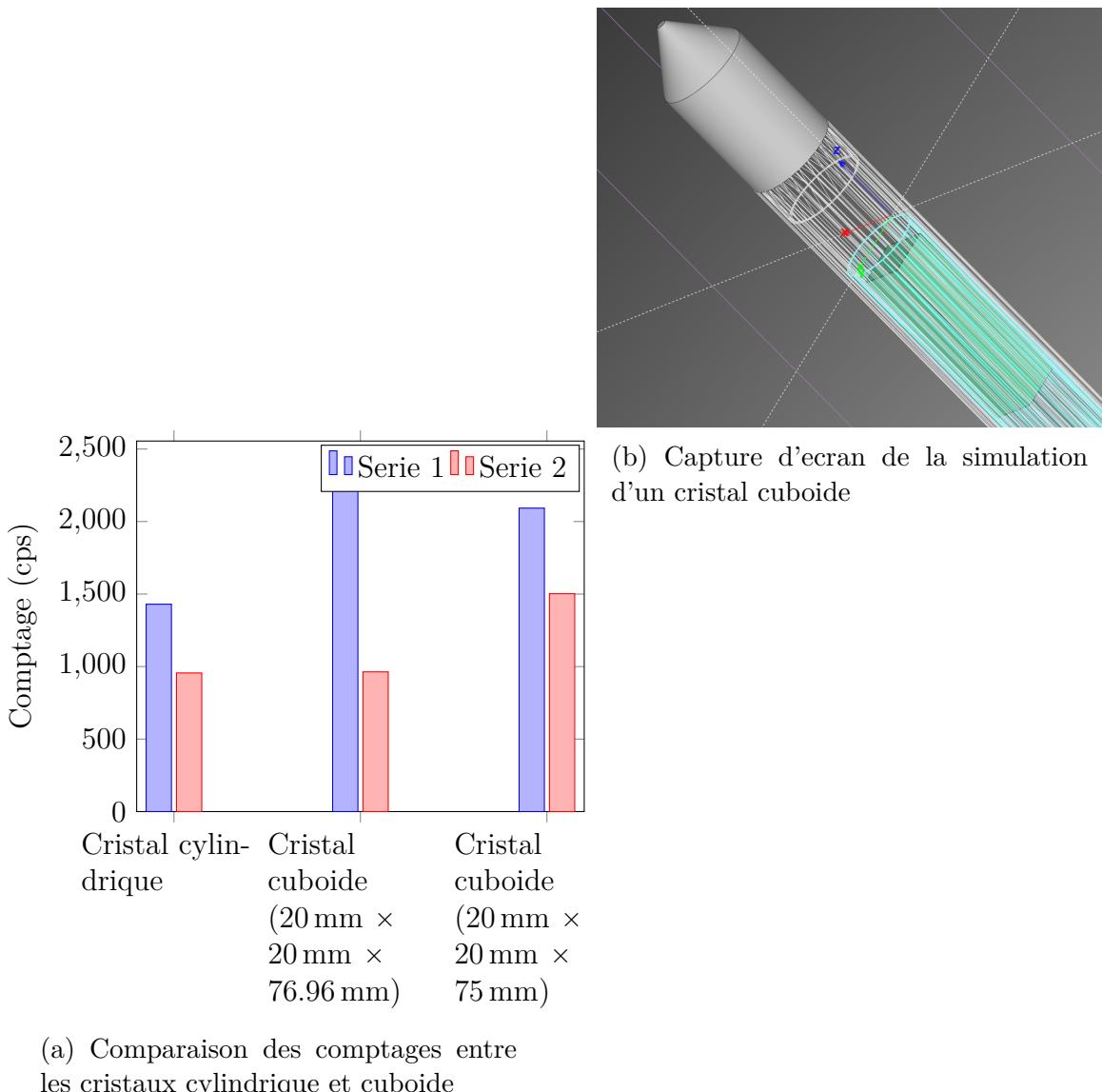
tron qui va créer un courant électrique proportionnel au nombre de photons qui entre. C'est le principe de la photodiode.

Notre détecteur peut être plus sensible si nous augmentons la tension alors nous commençons à observer un phénomène d'avalanche. En effet, quand une paire électron-trou est créée, elle va accélérer dans le champ électrique et libéré d'autre paire électron-trou. C'est le principe du photodétecteur avalanche (APD) (avalanche photodetector), mais nous arrivons rapidement à une limite ; à une certaine tension, dite la tension de claquage, la diode va se mettre à conduire dans le sens inverse. Dans ce cas, le photon que nous détecterons en premier créera un courant qui s'entretiendra tout seul. Pour empêcher cela, il faut donc limiter le courant du signal. Dans le cas des SiPM, cela est fait avec une résistance et une accumulatrice pour former ce qu'on appellera un SPAD (Single photon avalanche diode).

Dans un SiPM, nous allons relier en parallèle des centaines, voir des milliers de ces SPAD (voir [figure 7b](#)). Ainsi, on augmente la surface de détection pour un photon. Actuellement, dans le commerce, la taille la plus grande de SiPM disponible est de 6*6 mm [11]. En couplant plusieurs SiPM en parallèle, on peut donc détecter des photons sur une surface plus grande.

7 Simulation

Une différence entre les tube photomultiplicateur et les SiPM est que les tube photomultiplicateur ont une zone de détection en forme de rond alors que les SiPM ne peuvent que être produits en carré et donc leur zone de détection carré. Cela implique donc un changement de forme de cristal. Pour s'assurer que les anciens cristaux et les nouveaux se comportent de la même manière, nous allons faire une simulation. Les cristaux NaI utilisés actuellement sont des cylindres de 28mm de diamètre et 50mm de hauteur. Pour que les nouveaux cristaux cubiques rentrent dans le boîtier, ils doivent avoir une longueur et une lar-



geur de 20mm et pour que le volume, et donc normalement le nombre de detection, reste le même, ils doivent avoir une hauteur de 76.96mm. Nous testerons également un cristal avec un hauteur de 75mm pour voir si la petite différence de volume a un impact sur les résultats.

Un autre stagiaire travailler sur des sujets de simulation et a donc pu faire ces simulations pour moi. Malheureusement il n'avait pas encore eu accès au serveur de calcul d'orano et donc a dû les faire tourner à plus basse résolution sur son ordinateur.

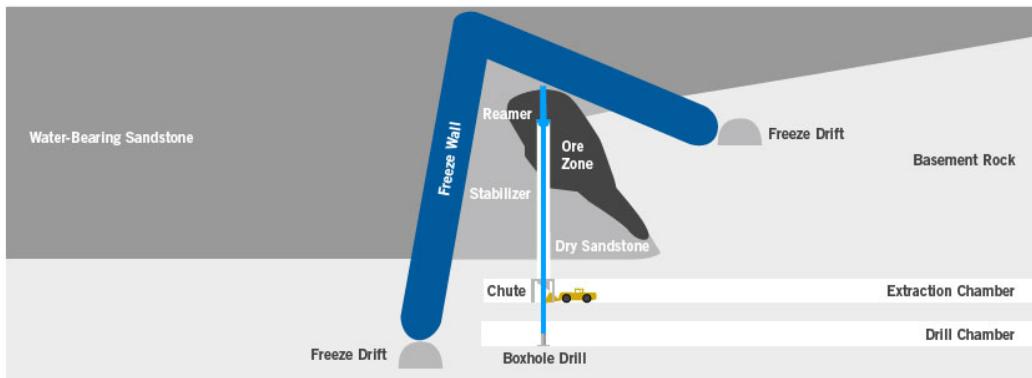
Références

- [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 (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] IAEA (International Atomic Energy AGENCY). *Depleted Uranium*. URL : <https://www.iaea.org/topics/spent-fuel-management/depleted-uranium> (visité le 04/06/2024).
- [4] 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>.
- [5] 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-reférence/apres-mines-france-orano-mining> (visité le 27/05/2024).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] SO FLYCKT et C MARMONIER. *Photomultiplier tubes – principles & applications*. Photonis, 2002. URL : https://www2.pv.infn.it/~debari/doc/Flyckt_Marmonier.pdf.
- [9] Leong LEE et al. « Comparison of Accuracy and Precision of GPS-Enabled Mobile Devices ». In : *2016 IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT)*. Déc. 2016, p. 73-82. DOI : <10.1109/CIT.2016.94>.
- [10] 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).
- [11] ONSEMI. *Silicon Photomultiplier (SiPM) Modules*. URL : <https://www.onsemi.com/products/sensors/photodetectors-sipm-spad/silicon-photomultipliers-sipm#products=fjIyNDkwOX52YWx1ZX4xfjYgbW0geCA2IG1tfg==> (visité le 04/06/2024).

A Technique d'extraction

Source : [Cameco Mining Methods](#)

Boxhole Boring

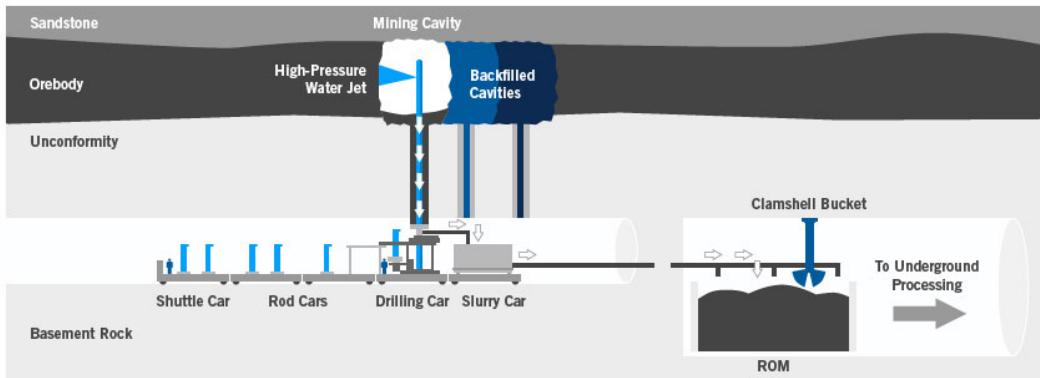


Boxhole boring is similar to the [Raisebore Mining](#), but the drilling machine is located below the mineralization, so development is not required above the mineralization. From a drill chamber in waste rock below the ore, we drill a series of overlapping holes up through the ore zone and collect the 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 Stoping

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.

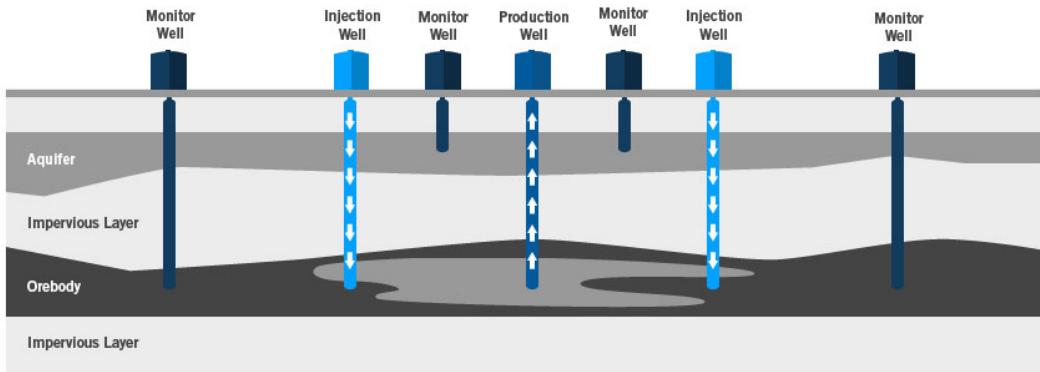
Jet Boring



Jet boring involves freezing the ore and surrounding rock in order to mine safely at Cigar Lake. Brine, chilled to -40C, 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](#)

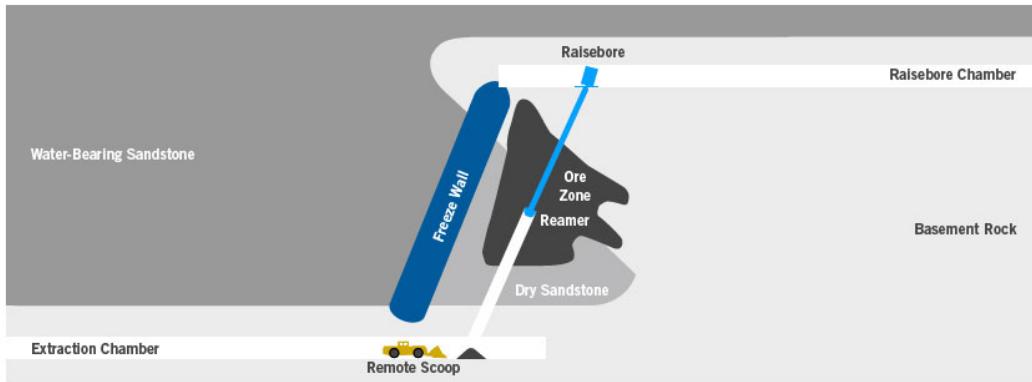
In Situ recovery



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.