

# 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

Je tiens à remercier Olivier GERBAUD, Emmanuel DUGUEY et Sylvain PETITEAU pour m'avoir expliqué leur travail, ce qui m'a permis de mieux comprendre les enjeux. Un grand merci également à Ilias BOUTALEB pour avoir réalisé les simulations. Je suis particulièrement reconnaissant envers mon maître de stage, Youcef BENSEDIK, qui, malgré un emploi du temps chargé, a toujours trouvé le temps de faire le point avec moi et de m'apporter des explications. Je remercie également Arnaud WUILBEAUX ainsi qu'Orano de m'avoir accueilli pendant ce stage, ainsi que toutes les équipes qui ont pris le temps de m'expliquer le fonctionnement de diverses procédures et méthodes de production.

## Résumé

Lors de mon stage, j'ai travaillé sur un projet déjà existant, la CanOp, avec comme objectif de l'améliorer. J'ai d'abord conduit une analyse de données afin de permettre un suivi de la production mensuel de la mine de Somaïr. J'ai ensuite étudié les différentes solutions pour alléger la CanOp et j'ai finalement focalisé la majeure partie de mon travail sur la faisabilité d'utiliser une nouvelle technologie de capteur, les SiPM. À l'issue de mon stage, la technologie semble prometteuse et fera l'objet de futurs développements.

# Table des matières

<b>Remerciement</b>	<b>1</b>
<b>Résumé</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>3</b>
1.1 Orano . . . . .	3
1.2 Orano Mining . . . . .	3
1.2.1 La génération de nouveaux projets . . . . .	4
1.2.2 L'exploration . . . . .	4
1.2.3 L'exploitation . . . . .	4
1.2.4 Le traitement . . . . .	4
1.2.5 L'après-mine . . . . .	5
1.3 Direction de la transformation digitale . . . . .	5
1.4 Choix du Stage . . . . .	5
1.5 Objectif du stage . . . . .	6
<b>2 Somaïr</b>	<b>6</b>
2.1 L'exploration . . . . .	6
2.2 L'extraction . . . . .	6
2.3 Classification des slabs . . . . .	7

<b>3</b>	<b>CanOp</b>	<b>8</b>
3.1	Les sondes Gamma . . . . .	8
3.2	Le GPS différentiel . . . . .	9
3.3	L'électronique . . . . .	10
<b>4</b>	<b>L'analyse des données</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Amélioration de la CanOp</b>	<b>12</b>
5.1	Alléger le GPS . . . . .	13
5.2	Alléger les sondes . . . . .	13
5.3	Répartir l'effort sur l'opérateur . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Les SiPM, un détecteur de lumière</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Simulation</b>	<b>15</b>
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>16</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>17</b>

## Table des figures

1	Carte des activités d'Orano dans le monde . . . . .	3
2	Apparence du yellow cake . . . . .	5
3	Photo d'AP utilisant un compteur Geiger Müller et la CanOp . . . . .	7
4	Fonctionnement d'une sonde gamma à scintillation . . . . .	8
5	Photo d'un aide-prospecteur tenant la CanOP . . . . .	9
6	Erreur du GPS et fonctionnement GPS RTK . . . . .	10
7	Capture d'écran d'un dashboard PowerBI . . . . .	11
8	Corrélation entre la radiométrie et la teneur d'uranium . . . . .	12
9	Schéma du fonctionnement d'un SiPM. . . . .	14
10	Composition d'un SiPM . . . . .	14
11	Simulation de détection de rayonnement gamma . . . . .	15

# 1 Introduction

Pour mon stage de fin de licence, j'avais le choix entre un stage de 7 semaines en entreprise ou en laboratoire, selon que je souhaitais m'orienter vers le monde professionnel ou académique. Étant donné que je veux me diriger vers une carrière professionnelle, j'ai choisi d'effectuer mon stage en entreprise chez Orano.

## 1.1 Orano

Orano est un grand groupe français spécialisé dans le cycle du nucléaire. Il compte 17 500 collaborateurs repartis dans 17 pays et avait un chiffre d'affaire de 4,8 M€ en 2023 [1]. Né en 2018 à la suite d'une restructuration d'Areva, il est présent dans l'ensemble du cycle du combustible 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 business units :

**Orano Support** regroupe les activités de support du groupe.

**Orano Mining** regroupe les activités d'extraction d'uranium.

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

**Orano Batteries** regroupe les activités de recyclage de batterie.

**Orano Dismantling** regroupe les activités de démantèlement de centrale nucléaire.

**Orano Chimie-Enrichissement** regroupe les activités de chimie et d'enrichissement de l'uranium.



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

## 1.2 Orano Mining

En ce qui concerne Orano Mining, Ces filiales sont présentes à l'international avec des mines d'uranium au Kazakhstan, au Canada et au Niger, ainsi que des explorations 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 en raison de la nature de ses activités. C'est dans cette dernière que j'ai effectué mon stage.

Orano mining est en charge de tout ce qui est relatif à l'extraction de l'uranium. Ces activités sont reparties en 5 grands domaines :

### 1.2.1 La génération de nouveaux projets

La mine mène de nombreux projets qui peuvent prendre diverses formes. Cela va de la création de petits projets comme de nouveaux outils à la recherche de nouveaux gisements et la création des infrastructures pour les exploiter. Par exemple, Orano a créé une usine de traitement au Kazakhstan ainsi qu'une base de vie associée. En Namibie, Orano a créé une usine de dessalage pour subvenir aux besoins en eau de la future mine de Trekkopje.

### 1.2.2 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.

### 1.2.3 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 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).

**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. 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. C'est le cas de la mine Cigar Lake au Canada.

### 1.2.4 Le traitement

Le traitement est la dernière étape de l'extraction de l'uranium. Elle consiste à traiter le mineraï pour en extraire l'uranium. Pour cela, Orano Mining utilise des méthodes de traitement chimique pour extraire l'uranium du mineraï. 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 à 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]

### 1.2.5 L'après-mine

L'après-mine désigne l'ensemble des actions de remédiation et de monitoring qui sont effectuées 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 remédiation 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 remédiation 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].



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

## 1.3 Direction de la transformation digitale

Au sein de la mine, un service de la direction des projets est responsable de la transformation digitale. C'est là que j'ai effectué mon stage. Ce service met en place divers outils digitaux pour accompagner les projets et les exploitations dans le monde numérique de demain. Il travaille en collaboration avec les différents services de la mine pour comprendre leurs besoins et mettre en place des outils qui y répondent. Voici quelques exemples de projets en cours lors de mon stage :

- La digitalisation des procédures de Katco, la joint-venture d'Orano au Kazakhstan.
- La numérisation et l'indexation des documents de la mine ainsi que des plans géologiques afin de les rendre plus facilement accessibles aux collaborateurs.
- La collecte et l'analyse de données pour trouver des solutions permettant de gagner en efficacité.

## 1.4 Choix du Stage

J'envisage plus tard de devenir ingénieur en [mecatronique](#) et j'ai donc chercher un stage orienter en informatique, en électronique, en mécanique ou idéalement, un mix des trois. Le nucléaire est également un sujet qui m'intéresse et dont je comprends un certain nombre de choses. J'ai donc postulé 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 de l'innovation pour améliorer ses activités, mais souvent il y a un manque de temps et de ressource pour revenir sur des projets déjà existants. J'ai donc été recruté pour essayer d'apporter des optimisations à un outil déjà existant : La [CanOp](#). Cet outil a été développé entre 2018 et 2022 et pesé environ 5kg. L'objectif du stage était de le rendre plus léger et plus robuste.

## 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 dont je dois comprendre le fonctionnement pour donner des suggestions cohérentes. Somaïr est une joint venture entre Orano et le Niger.

### 2.1 L'exploration

Le cycle de vie de la mine commence par trouver un gisement exploitable. Le service Geoscience de la mine en est responsable. Il y a une petite équipe d'experts qui en analysant les données géologiques et géopolitiques où il est possible de 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 n'avons aucune information sur la zone et il faut donc établir les cartes géologiques et mener un raisonnement sur quel processus géologique aurait pu concentrer l'uranium à un endroit donné. Il est nécessaire ensuite de faire des forages<sup>1</sup> pour vérifier nos hypothèses.

**L'exploration "brown fields"** Sur les sites où l'on exploite de l'uranium, certaines zones ont déjà eu des forages ou sont à proximité de zones exploitées. On va donc reprendre les données brutes relatives à la zone et faire des analyses complémentaires.

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

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 classifié comme "ressource" et on peut alors passer à l'étape d'extraction.

### 2.2 L'extraction

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

---

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



(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

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

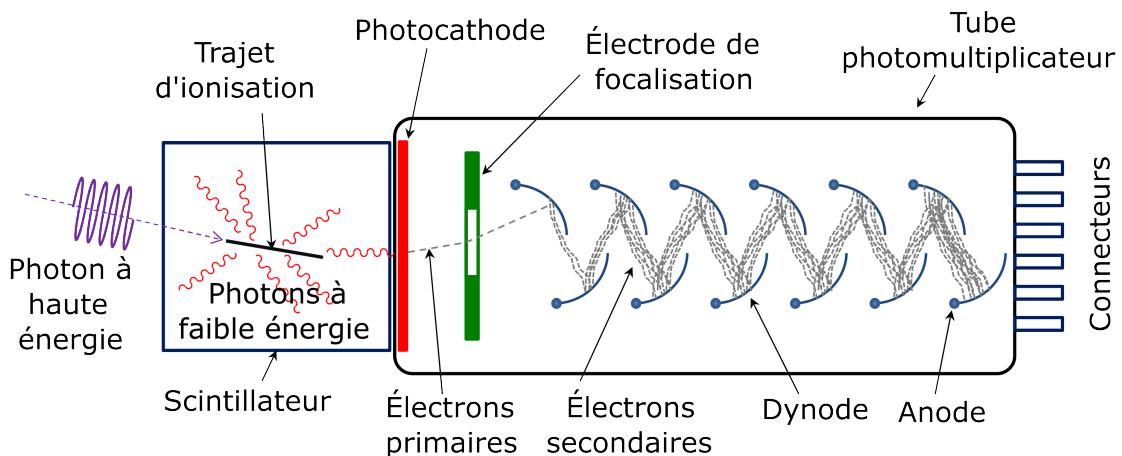
L'extraction de l'uranium se fait par "tir". Un tir est une explosion contrôlée qui va briser la roche en morceau plus petit. On délimiter une zone de 50\*50\*6 m dans lequel on perce des trous tous les 5 m. On utilise d'abord ces trous pour faire une mesure de radiométrie qui va nous permettre d'établir un plan de trie avant de leurs remplir d'explosifs. Une fois les explosifs détonner, un Aide Prospecteur (AP) va mesurer la teneur en uranium de chaque slab<sup>1</sup> pour le classer en fonction de sa teneur en uranium.

### 2.3 Classification des slabs

Pour savoir comment traiter ces slabs après extraction, elles sont catégorisées en 7 classes de M0 à M6 en fonction de leur teneur en uranium. Les slabs M0 sont dites stériles, car elles contient tellement peu d'uranium que l'on ne souhaite pas les traiter. Les classes M1 et M2 sont l'objet d'un traitement spécifique appelé lixiviation en tas. 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 leur classe. Il est donc important de bien classer les slabs, car sinon, soit on gaspille de l'acide ou alors il reste de 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 tache et optimiser le tri du minerai.

1. Un slab est un morceau de roche de 2.5\*2.5\*0.5m. C'est l'uniter de base de la mine



(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 fêture à gauche de l'étiquette. Dimension : diamètre 29\*114 mm



(d) Photo d'un cristal NaI en scintillation. Le pic d'émission du cristal est à 430 nm. Source : scionix.

FIGURE 4 – Fonctionnement d'une sonde gamma à scintillation

### 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 fournissent par la société Geovista
- une partie électronique qui inclue 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.

#### 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'iode avec quelque atome de thallium reparti 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 déexcitant, 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 haut en énergie en quelque chose avec moins d'énergie que nous savons mesurer. (voir partie gauche de la [figures 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 dû à l'effet photoélectrique. Les électrons résultants sont ensuite accélérés vers la première dynode, car elle a un potentiel  $\sim 100$  V. Comme 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  $\sim 100$  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 de haute tension, car la photocathode sera maintenue à  $\sim -1200$  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 au niveau 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 faits à partir de la sonde haute et 29 % à partir de la sonde basse. Les autres mesures sont faites avec une combinaison des deux.

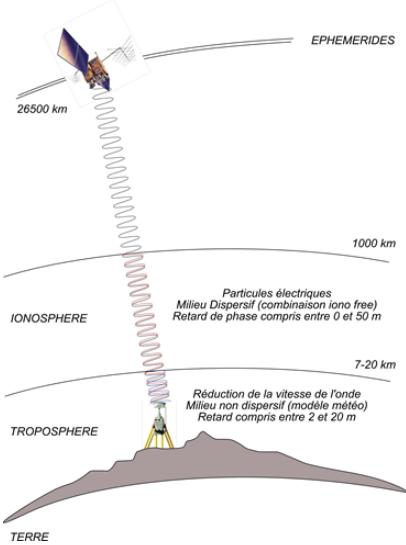
### 3.2 Le GPS différentiel

Pour que la CanOp puisse fonctionner correctement, il faut qu'elle soit située très précisément ( $\pm 10$  cm sur les axes x et y et  $\pm 1$  cm sur les axes z), or un GPS classique n'arrive qu'à atteindre  $\pm 3$  m horizontalement et  $\pm 5$  m verticalement [9] dus notamment aux perturbations atmosphériques que subissent les signaux.

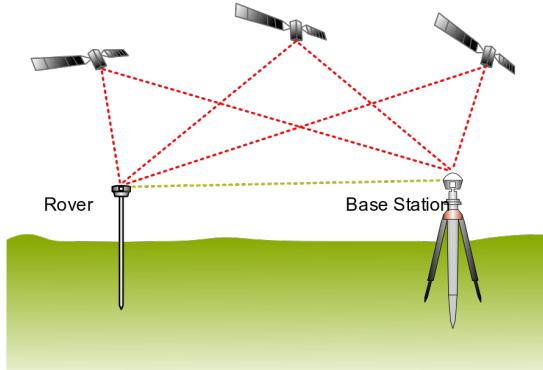
Une des solutions possibles pour contourner ces problèmes est d'utiliser un GPS différentiel. Le principe de fonctionnement est simple, une



FIGURE 5 – Photo d'un aide-prospecteur tenant la CanOP



(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 6 – Erreur du GPS et fonctionnement GPS RTK

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 composée 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 au moyen d'un bouton-poussoir qui peut lui donner du feed-back sur l'état de la sonde à travers deux LED intégré au bouton. Les données issues des sondes sont juste des pulses de courant que le second PCB convertit en signal numérique. Ces données sont ensuite agrégé avec les données du GPS qui sont transmis avec 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 son un connecteur 7 broches qui est multifonctions. 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 s'y 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 interconnectés grâce à un connecteur 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 l'on sépare les deux parties de la sonde.

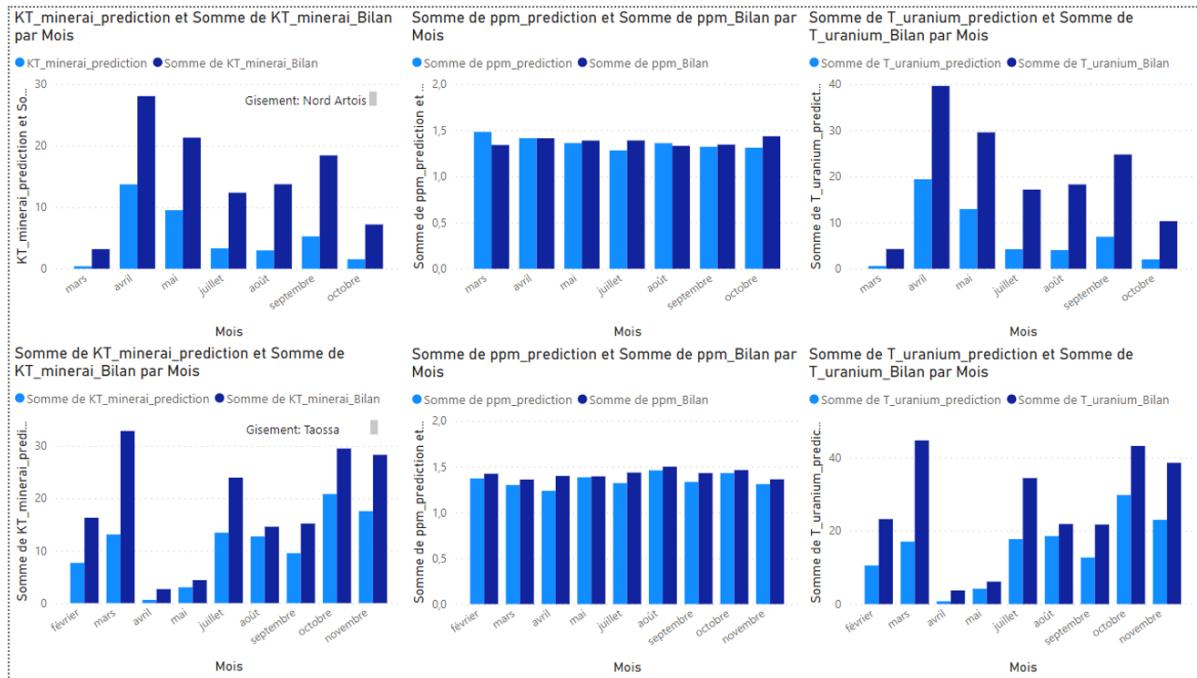


FIGURE 7 – Capture d’écran d’un dashboard PowerBI que j’ai créé pour suivre la production mensuelle de la mine de Somaïr

## 4 L’analyse des données

Une des premières tâches que j’ai effectuée 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 hébergé 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 librairie [Pandas](#) et [Numpy](#).

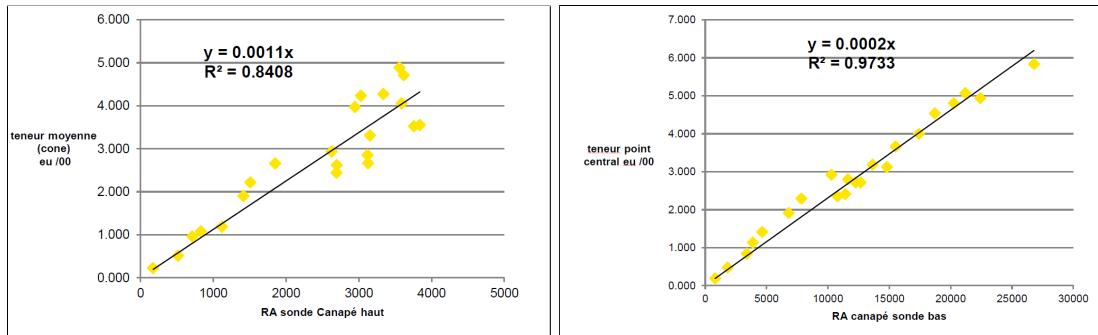
Les données en provenance de la CanOp ont d’abord besoin d’être nettoyées, car il y a parfois des problèmes de mesure, des bugs et l’opérateur a la possibilité de supprimer une mesure, mais cette fonctionnalité est implémentée de telle manière que la mesure est toujours présente, mais avec une valeur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

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

Ces corrélations ont été obtenues directement dans la fosse de Somaïr avec des mesures empiriques (voir [figure 8](#)).

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



(a) Corrélation pour la sonde haute

(b) Corrélation pour la sonde basse

FIGURE 8 – 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 constitué la table des données mensualisée, il fallait ensuite la représenter et la comparer aux données fournies de production d’uranium à la sortie de l’usine de traitement. Pour cela, j’ai découvert un autre outil très utilisé à Orano : PowerBI. PowerBI est un outil de la suite Microsoft 365 qui permet de faire des graphiques et des tableaux de bord à partir de tableau de donnée. Cet outil est particulièrement intéressant pour plusieurs raisons : il est très facile de créer des graphes utiles rapidement, il est possible de faire des graphiques dynamiques, c'est-à-dire qui se mettent à jour quand les données changent. Les données peuvent aussi être mises à jour automatiquement à partir d’une source externe. On peut donc créer des rapports sur la production mensuelle d’uranium de manière totalement automatiser et qui se mette à jour tout seul.

## 5 Amélioration de la CanOp

Un des problèmes majeurs de la CanOp reste son poids relativement conséquent, à savoir 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, il avait été envisagé de changer l’armature d’aluminium pour de la fibre de carbone.

Une partie importante de mon travail a donc était d’étudier et de proposer des solutions à ce problème. Assez rapidement, trois axes d’amélioration sont apparus.

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 à appliquer 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 scinti-bloc 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 des recherches, je suis tombé 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 fêlure sur la [figure 4c](#))

Ces avantages permettent de produire des sondes gamma pesant 25 g pour les plus petits comparer à environ 150 g 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. Pour ces raisons, 2 capteurs ont été commandés par mon maître de stage pour être prochainement évalués.

## 5.3 Répartir l'effort sur l'opérateur

Une autre solution pour alléger la charge de l'opérateur serait de répartir l'effort grâce à un bras articulé. En effet, les opérateurs de caméra de cinéma sont confrontés à un problème similaire et pour des plus petites caméras ils utilisent un harnais auquel est attaché un bras qui grâce à des ressorts permet de soulever la caméra. Cette solution a l'avantage de ne pas demander de modification de la sonde et peut rapidement être mise en place. Cependant, elle ne permet pas de réduire le poids de la sonde et peut rendre le dispositif plus encombrant.

# 6 Les SiPM, un détecteur de lumière

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 est composé 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 utilisé 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 10a](#)). En choisissant judicieusement ces 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 électron qui va créer un courant électrique proportionnel au nombre de photons qui entre. C'est le principe de la photodiode.

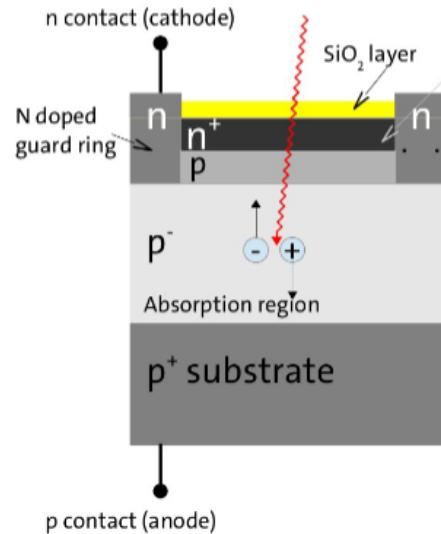
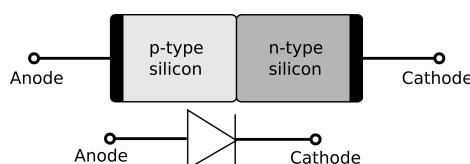
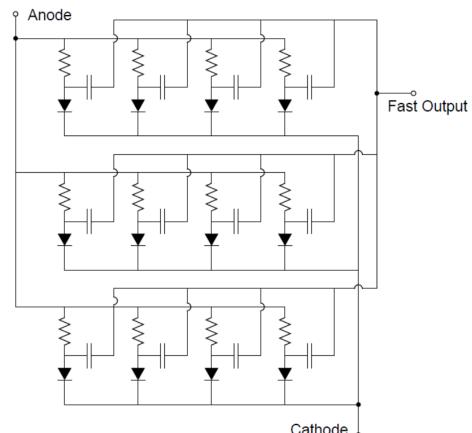


FIGURE 9 – Schéma du fonctionnement d'un SiPM.



(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 10 – Composition d'un SiPM

Notre détecteur peut être plus sensible si nous augmentons la tension, alors que 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 libérer 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 10b](#)). 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

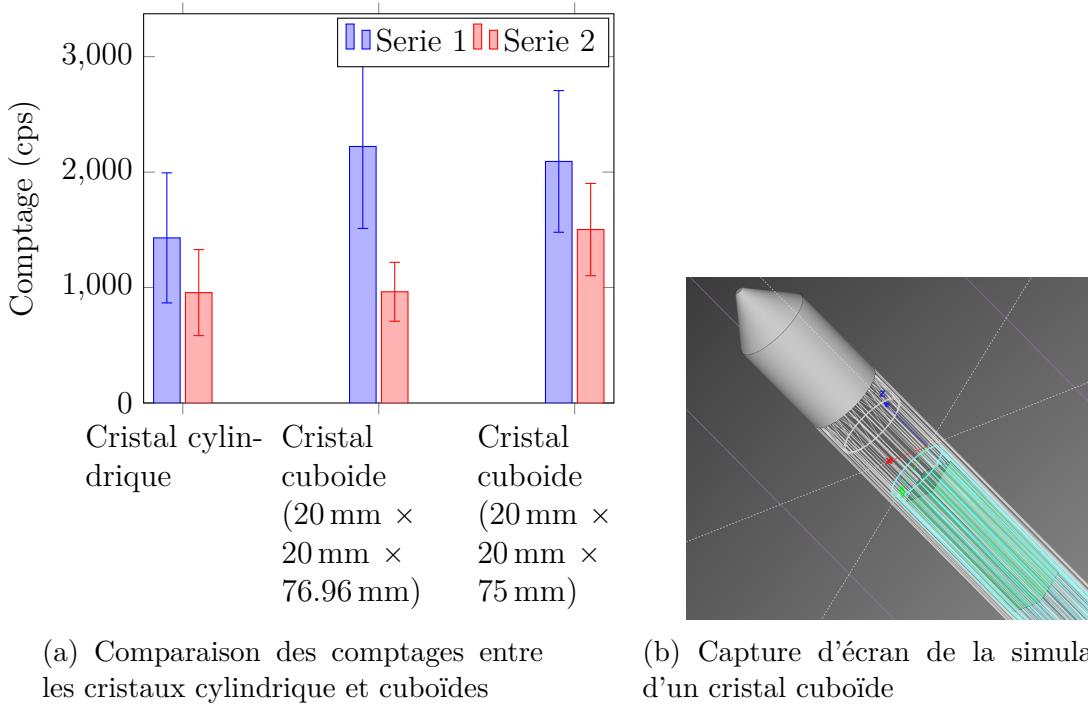


FIGURE 11 – Simulation de détection de rayonnement gamma

Une différence entre les tubes photomultiplicateur et les SiPM est que les tubes photomultiplicateur ont une zone de détection en forme de rond alors que les SiPM ne peuvent qu'être produits en carré et donc limite les formes des zones de détection. Cela implique donc un changement de forme de cristal. Pour nous assurer que les anciens cristaux et les nouveaux se comportent de la même manière, nous allons faire une simulation. Les cristaux NaI à utiliser actuellement sont des cylindres de 28 mm de diamètre et 50 mm de hauteur. Pour que les nouveaux cristaux cuboïdes rentrent dans le boîtier, ils doivent avoir une longueur et une largeur de 20 mm et pour que le volume, et donc normalement le nombre de détections, reste le même, ils doivent avoir une hauteur de 76,96 mm. Nous testerons également un cristal avec une hauteur de 75 mm pour voir si la petite différence de volume a un impact sur les résultats.

Un autre stagiaire a travaillé 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 une plus basse résolution sur son ordinateur, ce qui explique les incertitudes importantes sur la figure 11a.

## 8 Conclusion

Ce stage m'a permis de découvrir le secteur de l'industrie minière et de l'uranium. J'ai observé comment les données sont utilisées pour optimiser la production et comment les nouvelles technologies sont évaluées pour améliorer les processus. J'ai également vu comment les différents services d'une entreprise collaborent pour atteindre un objectif commun. Ce stage m'a aussi permis de développer mes compétences en analyse de données et pour trouver des solutions technologiques.

J'ai le sentiment d'avoir beaucoup appris, tant sur le plan humain, que sur le plan technique. J'ai pu mobiliser et approfondir mes connaissances pour comprendre en détail le fonctionnement d'un SiPM. Dans la continuité de l'enseignement de l'Institut Villebon *George Charpak* j'ai été amené à travailler en équipe et à résoudre de problème et ainsi, développer ces compétences. J'ai également découvert de nouveaux outils comme PowerBI et Pandas, qui me seront utiles dans le futur.

## 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](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](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).