

# 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

## Remerciement

J'aimerais remercier Youcef BENSEDIK et Arnaud WUILBEAUX ainsi que Orano de m'avoir accueillis 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

<b>Remerciement</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2 La mine d'uranium Somaïr</b>	<b>3</b>
<b>3 CanOp</b>	<b>4</b>
3.1 Les sonde Gamma . . . . .	4
3.2 Le GPS differencielle . . . . .	4
3.3 L'électronique . . . . .	6
<b>4 L'analyse des donnée</b>	<b>6</b>
<b>5 Amélioration de la CanOp</b>	<b>7</b>
5.1 Allonger le Gps . . . . .	7
5.2 Alléger les sonde . . . . .	7
<b>Bibliography</b>	<b>8</b>
<b>A Bilan Personnel</b>	<b>9</b>

## Table des figures

1	Shema d'une sonde gamma NaI . . . . .	4
2	Shema presentant les source d'erreur des GPS. Source : Orpheon . . . . .	5
3	Shema d'un systeme GPS differenciel . . . . .	5
4	Correlation entre la radiometrie et la teneur d'uranium pour les sonde haute et basse, Source : Compte-rendu de mission Orano, Réf. : IDF-CR-001714 .	6

# 1 Introduction

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.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pre-

tium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

## 2 La mine d'uranium Somaïr

Orano possède plusieurs mines dans le monde avec différentes manières d'extraction selon les conditions géologiques présentes et de la nature du gisement. C'est pourquoi les mines sont :

- Muyunkum et Tortkuduk au Kazakhstan avec un processus d'acide leaching
- McAthure River et Cigar Lake au Canada avec des méthodes de "jetboring"
- Somaïr au Niger avec une mine à ciel ouvert

Avant le début de l'extraction à Somaïr, des géologues ont réalisé des études pour trouver d'éventuels gisements grâce à des sondages<sup>1</sup>. Une fois un gisement trouvé, on va affiner la maille de sondage jusqu'à avoir un forage tous les 25 m. Si la décision de passer en production est prise, alors on va venir enlever toute la roche au-dessus du gisement (50 à 70 m à Somaïr) et 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 enterrera juste assez d'explosif pour fragiliser la roche et qu'une pelle mécanique puisse extraire le slab pour le charger dans un camion. Pour savoir comment traiter ces slabs après extraction, nous les catégorisons en 7 classes de M0 à M6. Les slabs M0 sont dits stériles car ils contiennent 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 ces slabs sont empilés et on attend que l'uranium descende par gravité jusqu'en bas. Enfin, les slabs de classe supérieure reçoivent un traitement dynamique ou en fonction de leur classe, ils seront dissous avec plus ou moins d'acide selon leurs classes. Il est donc important de bien classer les slabs car sinon, on gaspille soit de l'acide ou alors il reste de l'uranium non extrait dans notre refus.

Avant de classer un Slab, un Aide Prospecteur (AP) utilise un compteur Geiger Muller 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.

---

1. On réalise soit une carotte ou on fait un forage pour effectuer des mesures avec une sonde à plusieurs profondeurs.

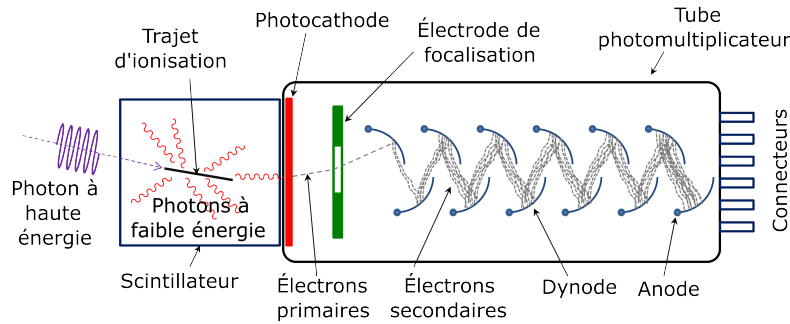


FIGURE 1 – Schéma d’une sonde gamma NaI. Source: [Qwerty123uiop](#), CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

### 3 CanOp

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

- 2 Sonde de rayonnement Gamma fournie par la société Geovista
- Une partie électronique qui inclut une batterie.
- Un GPS différentiel fournie par Ophelia

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

#### 3.1 Les sonde Gamma

Les sonde 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 haute énergie des rayons gamma pour les rémettre comme des photons plus basse énergie (Voir partie gauche de la [figure 1](#)) [1]

**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 1](#)) [1]

Pour diverses raisons, 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)

#### 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 due notamment à la perturbation atmosphérique 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. [2]

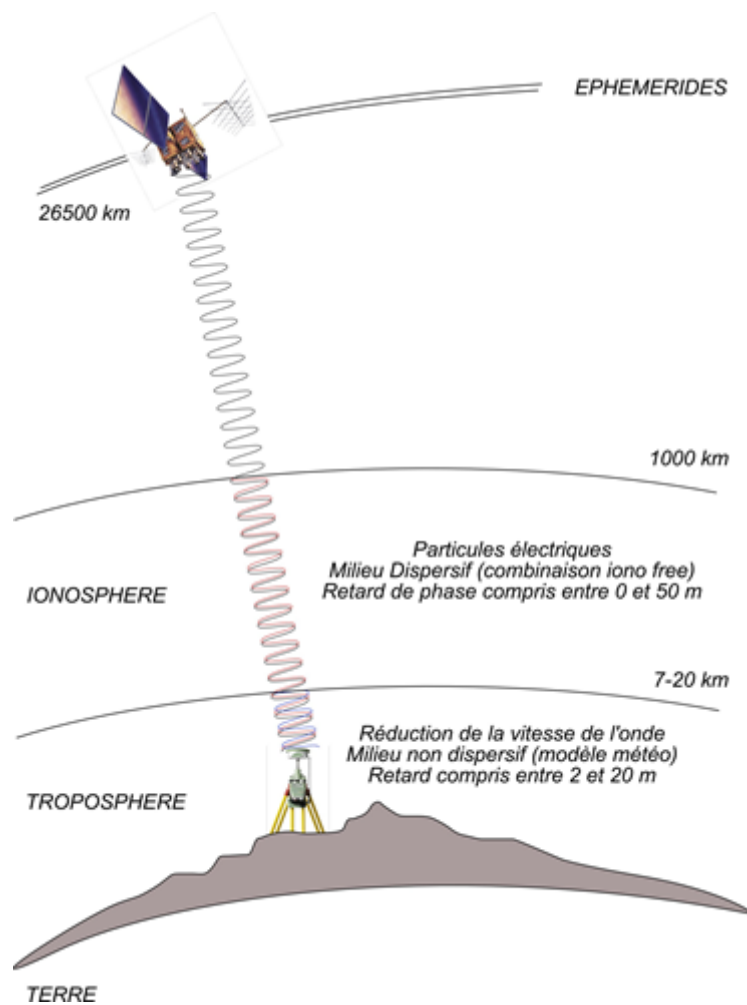


FIGURE 2 – Shema presentant les source d'erreur des GPS. Source: Orpheon

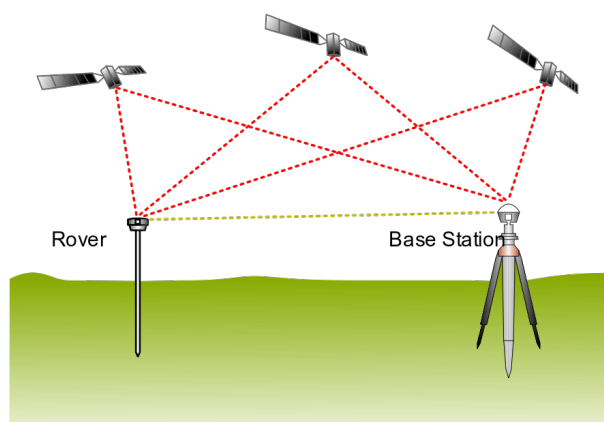


FIGURE 3 – Shema d'un systeme GPS differenciel. Source: [TS Eriksson](#), CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

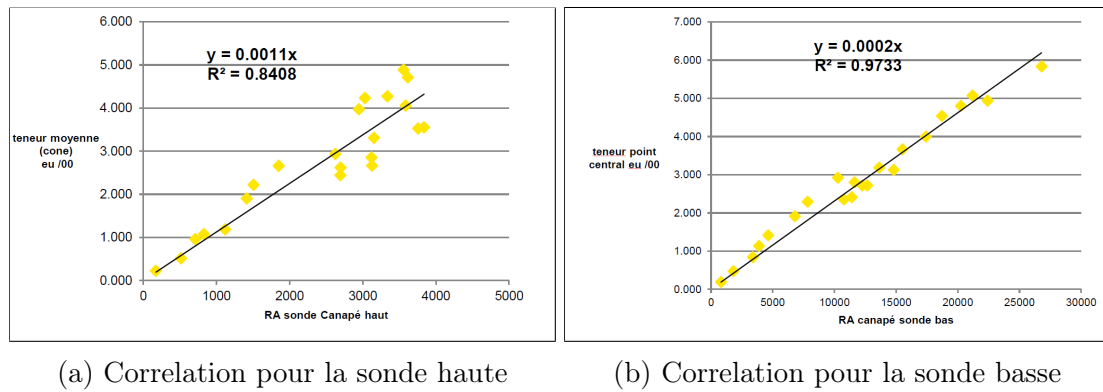


FIGURE 4 – Correlation entre la radiometrie et la teneur d’uranium pour les sonde haute et basse, Source: Compte-rendu de mission Orano, Réf. : IDF-CR-001714

### 3.3 L’électronique

## 4 L’analyse des donnée

Une des premiere tache que j’ai effectuer a été que recaculer a partir des donnée brute recolter sur chaque slab la production mensuelle des differnet fosse de Somaïr. Pour cela, j’ai eu access a la dataplatform de Orano qui est sur Dataiku.

Dataiku est un platform concu pour symplifier et democratiser l’annalyse de donnée, Pour cela, il n’y a meme pas besoin d’écrire une ligne de code car Dataiku a des recette visuel. Pour ceux qui shouite aller plus loin, il est possible d’écrire des recette en python ou en R. Pour effectuer mes analyse je me suis plutot appuyer sur les recette python qui exploite la librairie [pandas](#) et [numpy](#).

Les donnée en provenance de la CanOp on d’abord besoin d’etre nettoyer car il y a parfois des probleme de mesure, des bug et l’operateur a la possibiliter de supprimer une mesure mais cette fonctionaliter est implementer de tel maniere que la mesure est toujours presente mais avec une valeur de -1. Il faut donc supprimer tout ces valeur. J’ai egalement eu une colonne ne contenant que des numero mais dont certain etait sauver comme des string et d’autre comme des int.

J’ai ensuite pus etablire les teneur 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 correlation on etait obtenu directement dans le fosse de Somaïr avec des mesure empirique (voir [figure 4](#)).

A partir des teneur en uranium, j’ai pu repartir les slab et les chargement des different camion dans leur different class (voir ??). Une fois les chargement repartie, j’ai pus calculer la production mensuelle de chaque fosse en tenant compte de comment est fait le reporting de la production. En effet, la production est calculer du 26 du mois precedent au 25 du mois actuel sauf pour les mois de decembre/janvier et de juin/juillet ou la date limite est le 1er janvier/juillet a 5h. C’est la une autre subtiliter qui es presente chaque mois auquel

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

j'ai du faire face car la mine ne souhaite pas scinder en 2 la production de l'équipe de nuit (21h-5h)

## 5 Amélioration de la CanOp

Un des problème majeur de la CanOp reste son poids relativement conséquent de 5,5 kg. Ce poids peut paraître léger mais les opérateurs doivent porter la sonde à bout de bras pendant un shift de 8 hr sous le soleil avec une température qui monte régulièrement au dessus de 40°C. Déjà lors de sa conception on avait envisagé de changer l'armature d'aluminium à 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 axes d'amélioration sont apparus.

1. Alléger le gps
2. Alléger la sonde
3. Répartir 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 et corrige la sonde. Une solution pourrait être de fracturer la différente partie du GPS et de délocaliser le calcul de la position et de sa correction à l'appliquer depuis la tablette de l'opérateur en laissant l'antenne sur la sonde. D'autres solutions à partir de puces intégrées pourraient également mener à des économies de poids.

### 5.2 Alléger la sonde

Les sondes sur les CanOp sont des sondes en deux pièces composées d'un cristal scintillateur et d'un détecteur (ici un photomultiplicateur tube) (voir [section 3.1](#)). Ces sondes sont relativement lourdes et ne sont pas solides ce qui pose des problèmes de déconction accidentelle 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 à état solide SiPM qui pourraient remplacer les tubes photomultiplicateurs. Ces composants sont devenus un remplacement viable de PMT que très récemment et n'était donc pas disponible pour la V1 de la CanOp. Ces composants présentent de nombreux avantages :

- plus léger
- peu cher à fabriquer en masse (capitalisation sur les avancées faites en lithographie)
- moins cher
- 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 [?] pour les plus petites comparées à environ 150 g [?] pour les sondes classiques. De plus ces sondes sont bien plus faciles à rendre étanches car il n'y a plus besoin de séparer l'électronique du cristal.



## Références

- [1] Mirion. (2023) Lab experiment 1: Gamma-ray detection with scintillators. [Online]. Available: <https://www.mirion.com/discover/knowledge-hub/articles/education/gamma-ray-detection-with-scintillators-lab-experiment>
- [2] GISGeography. (2024) Lab experiment 1: Gamma-ray detection with scintillators. [Online]. Available: <https://gisgeography.com/gps-accuracy-hdop-pdop-gdop-multipath/>

## A Bilan Personnel