



Groupe Polytechnique

École Supérieure Polytechnique

Département (SID) et (MPG)

Projet industriel en Entreprise (PIE)

DataMine Synergy

REALISER PAR :

23004	23037
23014	23086
23015	23231
23029	23276

Sous la supervision de :

Sidi Biha
Didi Maghlah

Année académique :

2024-2025

Remerciement

Au terme de ce travail de recherche, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes et institutions qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Tout d'abord, mes sincères remerciements vont à **Monsieur Sidi Biha et Monsieur Didi Maghlah**, dont l'accompagnement, les conseils avisés et l'encadrement rigoureux ont été d'une aide précieuse tout au long de cette étude. Leur expertise et leurs remarques constructives m'ont permis d'approfondir ma réflexion et d'améliorer la qualité scientifique de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers **la société Aura Energy**, qui a mis à disposition une base de données essentielle pour l'analyse et l'exploitation des résultats. Leur collaboration a été déterminante dans la conduite de cette étude et a grandement facilité l'exploration des aspects géostatistiques liés aux concentrations d'uranium.

À toutes ces personnes et institutions qui ont, d'une manière ou d'une autre, soutenu cette étude, je vous exprime ma profonde gratitude.

Listes des figures

Figure 1 Concentration moyenne d'Uranium par intervalles de 1m	9
Figure 2 Boxplot des concentrations d'uranium par Lithologie.....	9
Figure 3 Boxplot des concentrations d'uranium par Lithologie.....	10
Figure 4 comparaison avec le granite	16
Figure 5 Comparaison des concentrations d'uranium avec la teneur moyenne dans la croûte terrestre	17
Figure 6 Comparaison des concentrations d'uranium avec le fond géochimique.....	19

Contents

Remerciement.....	1
Listes des figures	3
1. Introduction	5
Contexte du projet	5
Problématique.....	5
Objectifs	5
Méthodologie générale	5
2. Exploration des données	6
Présentation des données :.....	6
Nettoyage et prétraitement :.....	6
Première visualisation :	6
3. Partie l'Application :	7
Conception de l'Aplication:	7
Cartographie et interprétation géologique :.....	7
4. Résultats et Discussion	8
Analyse des résultats des modèles :	8
Limites et recommandations :	8
5. Conclusion et recommandations.....	9
Synthèse des résultats :.....	9
Perspectives	9

1. Introduction

Contexte du projet

L'exploration et l'exploitation des ressources minérales sont des enjeux majeurs dans le secteur Minière. L'uranium, en particulier, joue un rôle clé dans la production d'énergie nucléaire, ce qui en fait une ressource stratégique pour de nombreux pays. Dans ce contexte, la société Aura Energy a entrepris des recherches approfondies dans les régions d'Oued El Foula et Aïn Sder, situées dans le craton ouest-africain, plus précisément au sein du bouclier de Reguibat. Cette zone, d'intérêt géologique majeur, présente des formations rocheuses potentiellement riches en uranium, nécessitant des analyses détaillées pour confirmer leur viabilité économique.

L'étude géochimique menée par Aura Energy s'appuie sur une base de données issue de plusieurs campagnes de forage, totalisant 1 065 forages et 13 926 échantillons analysés. L'objectif principal est de caractériser ces gisements d'uranium en déterminant la nature des roches hôtes, la profondeur des niveaux uranifères et les relations chimiques avec d'autres éléments. Les résultats obtenus permettront non seulement de mieux comprendre la distribution de l'uranium, mais aussi d'optimiser les futures stratégies d'exploration et d'exploitation minière.

Le choix de cette région repose sur plusieurs facteurs. D'une part, elle appartient à une province paléoprotérozoïque où des intrusions granitiques riches en uranium ont été identifiées. D'autre part, l'histoire géologique du bouclier de Reguibat indique des processus d'altération et d'érosion favorisant l'accumulation et la concentration d'uranium en surface, un aspect crucial pour les projets miniers à faible profondeur. L'étude s'appuie sur des outils analytiques avancés, notamment des méthodes de spectrométrie de masse (ICP-MS) et de modélisation statistique, pour affiner la compréhension des paramètres géochimiques et minéralogiques associés aux dépôts uranifères.

Problématique

L'uranium est une ressource essentielle pour la production d'énergie nucléaire, mais sa distribution géologique est hétérogène et souvent difficile à exploiter de manière rentable. L'un des principaux défis auxquels font face les entreprises minières est l'identification de concentrations

économiquement viables de ce minerai, particulièrement dans des régions où la minéralisation est peu documentée.

Dans les régions d'Oued El Foula et Aïn Sder, bien que des indices de présence d'uranium aient été détectés, la nature exacte des gisements reste à déterminer. Plusieurs questions scientifiques et techniques se posent :

- Quels sont les mécanismes géologiques responsables de la concentration en uranium dans cette région ?
- Quelle est la relation entre l'uranium et d'autres éléments chimiques présents dans les formations granitiques locales ?
- L'uranium se trouve-t-il principalement dans des roches primaires (granites) ou dans des formations secondaires résultant de l'altération et de l'érosion ?
- Les teneurs observées permettent-elles d'envisager une exploitation économiquement viable ?

L'une des spécificités des dépôts étudiés est leur probable classification en tant que gisements d'uranium superficiels, formés par l'altération et l'érosion de granites riches en uranium. Ces types de gisements diffèrent des grandes mines d'uranium situées dans des formations précambriennes profondes et nécessitent une approche différente en matière d'exploration et d'exploitation. Comprendre la distribution verticale et latérale de l'uranium ainsi que ses corrélations avec d'autres éléments est donc essentiel pour valider le potentiel minier de la région.

Objectifs

L'étude menée par Aura Energy poursuit plusieurs objectifs scientifiques et stratégiques, visant à caractériser en détail les formations uranifères des régions d'Oued El Foula et Aïn Sder. Ces objectifs se déclinent en plusieurs axes :

1. Caractérisation du gisement

- Déterminer la nature et la composition minéralogique des roches hôtes.

- Évaluer la profondeur des niveaux riches en uranium et leur extension latérale.
- Identifier le type de dépôt, en distinguant les formations primaires (granites) des formations secondaires (alluvions, sédiments, calcrètes).

2. Analyse des corrélations chimiques et minéralogiques

- Identifier les éléments géochimiques associés à l'uranium (vanadium, thorium, zirconium, etc.).
- Étudier les processus d'altération et de migration des éléments chimiques dans le contexte géologique régional.
- Évaluer la pertinence de marqueurs géochimiques pour guider les futures explorations.

3. Évaluation économique et perspective d'exploitation

- Estimer la concentration moyenne en uranium et sa répartition dans les différentes faciès rocheux.
- Déterminer si les teneurs observées sont suffisantes pour envisager une extraction rentable.
- Proposer des recommandations pour l'optimisation des campagnes d'exploration et la mise en valeur du gisement.

4. Application des outils analytiques avancés

- Exploiter les bases de données géochimiques et géologiques pour affiner la modélisation des gisements.
- Utiliser les algorithmes de data science et de machine learning pour optimiser l'analyse des données.
- Concevoir une méthodologie reproductible permettant d'appliquer cette approche à d'autres régions similaires.

Grâce à cette étude, Aura Energy vise non seulement à confirmer l'existence d'un gisement exploitable, mais aussi à enrichir la compréhension scientifique des processus de formation des dépôts d'uranium dans la région du bouclier de Reguibat. La démarche adoptée permettra ainsi d'orienter efficacement les futures recherches et de maximiser les chances de succès des opérations minières.

Méthodologie générale

Collecte des données : L'étude s'appuie sur une base de données provenant d'une campagne de forage menée par la société Aura Energy. Un total de 1 065 forages a été réalisé avec des échantillons analysés pour la concentration en uranium et 37 autres éléments chimiques.

Analyse géochimique : Les concentrations d'uranium ont été déterminées par spectrométrie de masse à plasma inductif (ICP-MS) après préparation des échantillons dans des laboratoires spécialisés.

Traitement des données : Les analyses statistiques et la visualisation des données ont été réalisées à l'aide de bibliothèques Python telles que Pandas et Seaborn.

Interprétation des résultats : L'approche statistique permet d'évaluer la corrélation entre l'uranium et d'autres éléments chimiques, et d'identifier les processus géologiques impliqués dans sa concentration.

2. Exploration des données

Présentation des données :

Pour cette étude, nous disposons d'une base de données fournie par **Aura Energy**, qui regroupe des informations issues de campagnes de forage et d'analyses géochimiques. Les données sont stockées dans un fichier Excel (*Aura Mauritania Drilling 230712 .xls*), dont plusieurs feuilles sont exploitées dans notre analyse :

- **DHGeology** : Contient des informations détaillées sur la stratigraphie et la lithologie des formations traversées lors des forages. Cette feuille permet d'identifier les types de roches présents dans la zone d'étude, comme les granites, Colluvium, Calsilicate et autres formations géologiques pertinentes.
- **DHAssays** : Regroupe les résultats des analyses chimiques des échantillons prélevés.

L'importation des données a été réalisée à l'aide de la bibliothèque pandas.

Nettoyage et prétraitement :

Avant toute analyse approfondie, un prétraitement des données est nécessaire pour assurer leur qualité et leur cohérence :

- **Gestion des valeurs manquantes et aberrantes** : la Suppression des valeurs NaN dans la colonne U_ppm et le remplacement des valeurs négatives par 0 dans les colonnes numériques.
- **Harmonisation des types de données** : seule la conversion des colonnes HoleID, DepthFrom et DepthTo en chaînes de caractères (str) a été effectuée pour créer la colonne ID.
- **Filtrage des variables pertinentes** : la sélection des variables nécessaires à l'analyse exploratoire.
- **Création d'un identifiant unique (ID)** : La colonne ID a été générée en combinant HoleID, DepthFrom et DepthTo pour assurer une correspondance précise entre les enregistrements des différentes feuilles de données. Cette conversion garantit que chaque échantillon est identifié de manière unique avant la fusion des données.
- **Traitement des lithologies** : la normalisation des noms de lithologies en minuscules et la suppression des lithologies avec un nombre d'observations inférieur à 600.

Fusion des données : le filtrage préalable des HoleID communs entre DHGeology et DHAssays , ensuite renommer les colonnes avant la fusion pour éviter les conflits. Puis la fusion des feuilles **DHGeology** et **DHAssays** en utilisant la colonne ID comme clé commune. Cette fusion permet d'associer les informations lithologiques aux résultats d'analyses chimiques des échantillons prélevés, facilitant ainsi l'interprétation des corrélations entre la géologie et la composition chimique.

Ces opérations permettent d'éviter les biais liés à des données erronées ou incomplètes et garantissent des résultats plus fiables.

Première visualisation :

Une première exploration graphique des données a été réalisée afin d'identifier les tendances et relations entre les variables :

Analyse par profondeur

Un graphique linéaire représentant la concentration moyenne d'uranium (U_ppm) en fonction de la profondeur (DepthFrom), regroupée par intervalles de 1m.

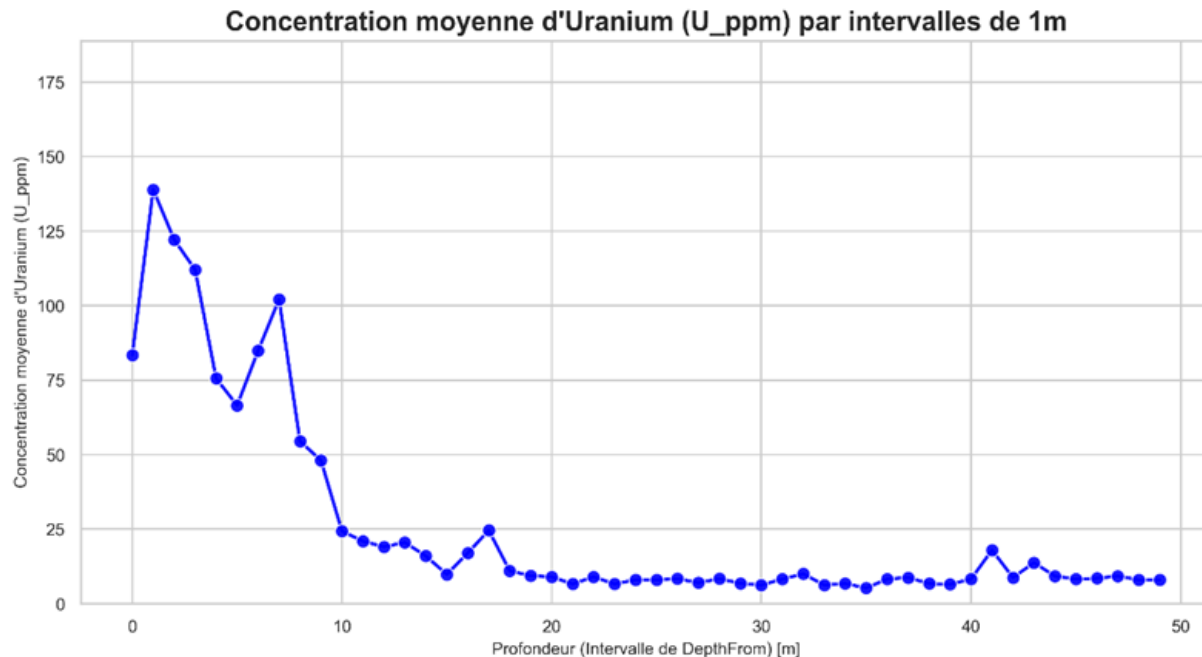


Figure 1 Concentration moyenne d'Uranium par intervalles de 1m

Cette distribution illustre le caractère **superficiel** de l'uranium, avec une concentration plus élevée en surface qui diminue progressivement en profondeur.

Distribution des concentrations d'uranium

Un boxplot des concentrations ($U_{ppm} \leq 1000$) par lithologie.

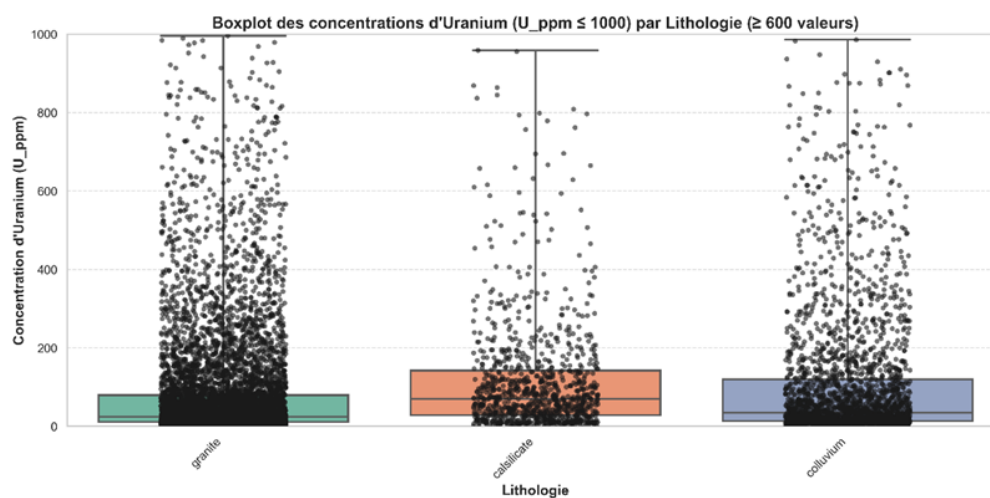


Figure 2 Boxplot des concentrations d'uranium par Lithologie

Le diagramme montre que les colluvions et les granites apparaissent comme les roches les plus riches en uranium, la majorité des échantillons se situant dans la plage de 0 à 500 ppm.

Corrélation entre éléments chimiques

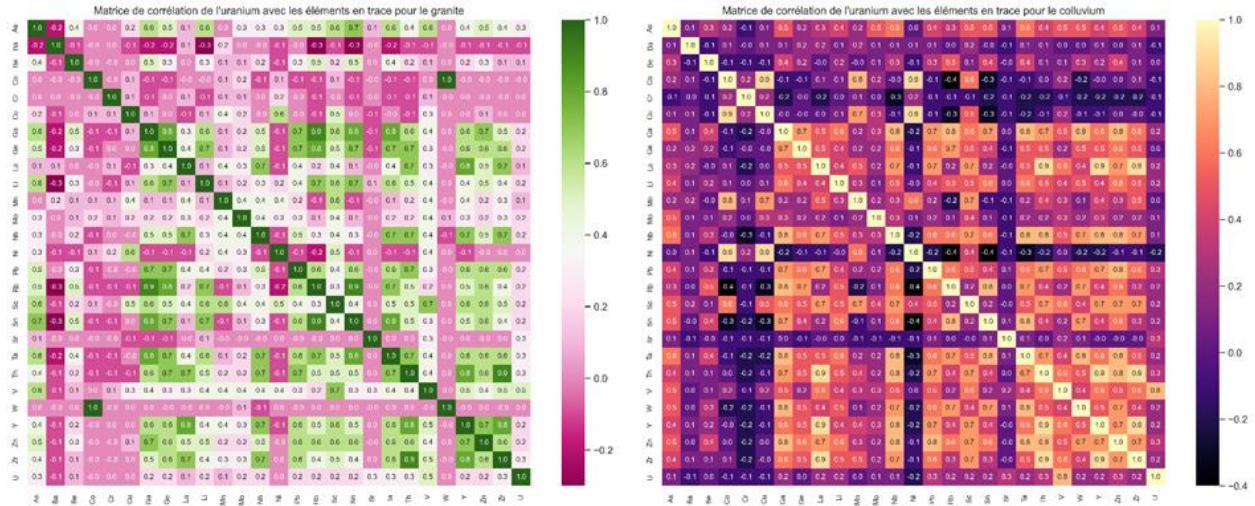


Figure 3 Boxplot des cocentrations d'uranium par Lithologie

Ces **deux matrices de corrélation** comparent les relations entre l'uranium (U) et divers éléments en trace dans deux types de formations géologiques : **Granite** et **Colluvium**. Une forte corrélation avec le **vanadium** est observée dans les deux lithologies étudiées, suggérant un possible contrôle géochimique commun sur la distribution de ces deux éléments.

3. Partie Application

Conception de l'Application

1. Présentation de l'Architecture

L'application suit une architecture **Modèle-Vue-Contrôleur (MVC)** implémentée via Django. L'architecture est centrée sur la gestion des trous de forage et des analyses chimiques, avec une base de données relationnelle sous MySQL.

2. Structure de la Base de Données

L'application utilise un **modèle relationnel** avec plusieurs tables interconnectées. Voici les principales entités et leurs relations :

1. Table DrillHole (Trous de forage)

Cette table stocke les informations principales de chaque trou de forage.

Champ	Type	Description
hole_id	VARCHAR(50)	Identifiant unique du trou
project	VARCHAR(191)	Nom du projet lié au forage
prospect	VARCHAR(191)	Région/prospection associée
easting	DOUBLE	Coordonnée Est du trou
northing	DOUBLE	Coordonnée Nord du trou

- **Relation** : Associé à **DrillInterval** (un trou peut avoir plusieurs intervalles de mesure).

2. Table DrillInterval (Intervalles de forage)

Stocke les informations des intervalles analysés dans un trou de forage.

Champ	Type	Description
id	INT (PK)	Clé primaire auto-incrémentée
depth_from	DOUBLE	Profondeur de début d'intervalle
depth_to	DOUBLE	Profondeur de fin d'intervalle
lithology	VARCHAR(191)	Type de roche rencontré
drill_hole_id	VARCHAR(50)	Référence au trou de forage

- **Relation :** Associé à **DrillHole** (un trou peut avoir plusieurs intervalles).
- **Relation :** Associé à **ChemicalAnalysis** (un intervalle peut contenir plusieurs analyses chimiques).

3. Table ChemicalAnalysis (Analyses chimiques)

Stocke les analyses chimiques effectuées sur un intervalle donné.

Champ	Type	Description
id	INT (PK)	Clé primaire auto-incrémentée
interval_id	INT	Référence à un intervalle de forage

- **Relation :** Associé à **DrillInterval** (un intervalle peut avoir plusieurs analyses chimiques).
- **Relation :** Associé à **ElementValue** (chaque analyse peut contenir plusieurs valeurs d'éléments).

4. Table ElementValue (Valeurs des éléments chimiques)

Stocke les concentrations des éléments analysés.

Champ	Type	Description
<code>id</code>	INT (PK)	Clé primaire auto-incrémentée
<code>analysis_id</code>	INT	Référence à l'analyse chimique
<code>element</code>	VARCHAR(20)	Nom de l'élément chimique (ex: U, Th, Fe)
<code>value</code>	DOUBLE	Concentration de l'élément
<code>unit</code>	VARCHAR(10)	Unité de mesure (ppm, ppb, pct)

- **Relation** : Associé à **ChemicalAnalysis**.

3. Contraintes et Optimisations

Indexation des données

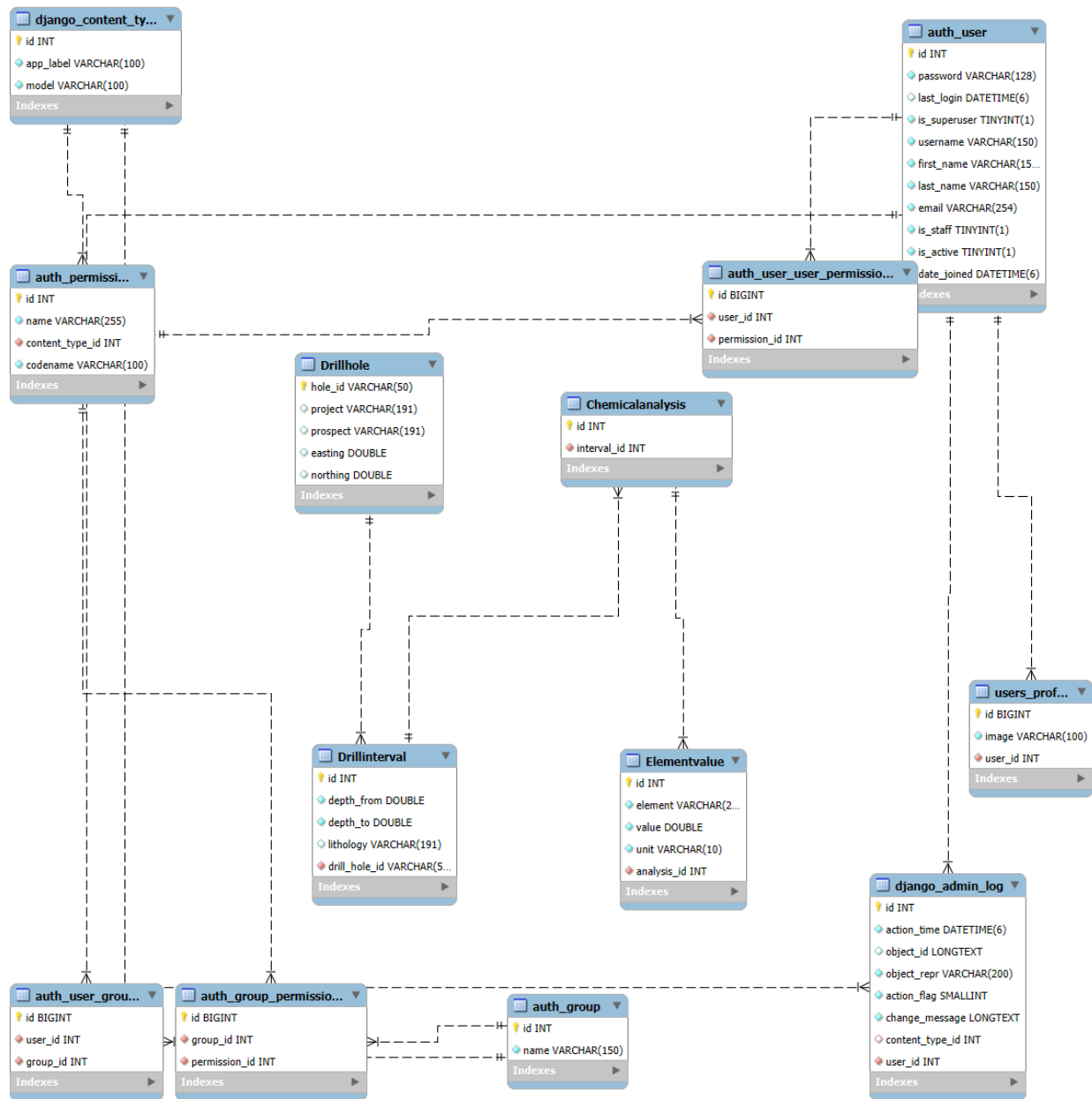
Pour améliorer la performance des requêtes, les index suivants ont été créés :

- **DrillHole** : Index sur `project` et `prospect`
- **DrillInterval** : Index sur `drill_hole_id`
- **ChemicalAnalysis** : Index sur `interval_id`
- **ElementValue** : Index sur `analysis_id` et `element`

5. Diagramme Relationnel

L'image ci-dessus représente le **Modèle Entité-Relation (MER)** de la base de données. Voici un résumé des relations :

- **Un DrillHole peut contenir plusieurs DrillIntervals.**
- **Un DrillInterval peut contenir plusieurs ChemicalAnalysis.**
- **Une ChemicalAnalysis peut contenir plusieurs ElementValues.**



Cartographie et interprétation géologique :

4. Résultats et Discussion

L'objectif de cette analyse est de comparer les **concentrations d'uranium des échantillons** à trois **références géologiques** afin d'identifier les anomalies et d'évaluer le potentiel uranifère de la zone d'étude.

Les comparaisons sont effectuées avec :

Le granite (4.8 ppm)

La croûte terrestre (2.7 ppm)

Le fond géochimique (moyenne + 2σ , calculé à partir des données)

Ces seuils permettent de déterminer si les échantillons sont **significativement enrichis en uranium** et d'identifier les **anomalies**.

1. Comparaison avec le granite (4.8 ppm)

Observation:

- La **majorité des échantillons** présente des valeurs **largement supérieures à 4.8 ppm**.
- Cela signifie que **l'uranium est concentré dans certaines formations**, notamment les **granites et colluvions**.

Comparison of Uranium Concentrations in samples with the average in Granite

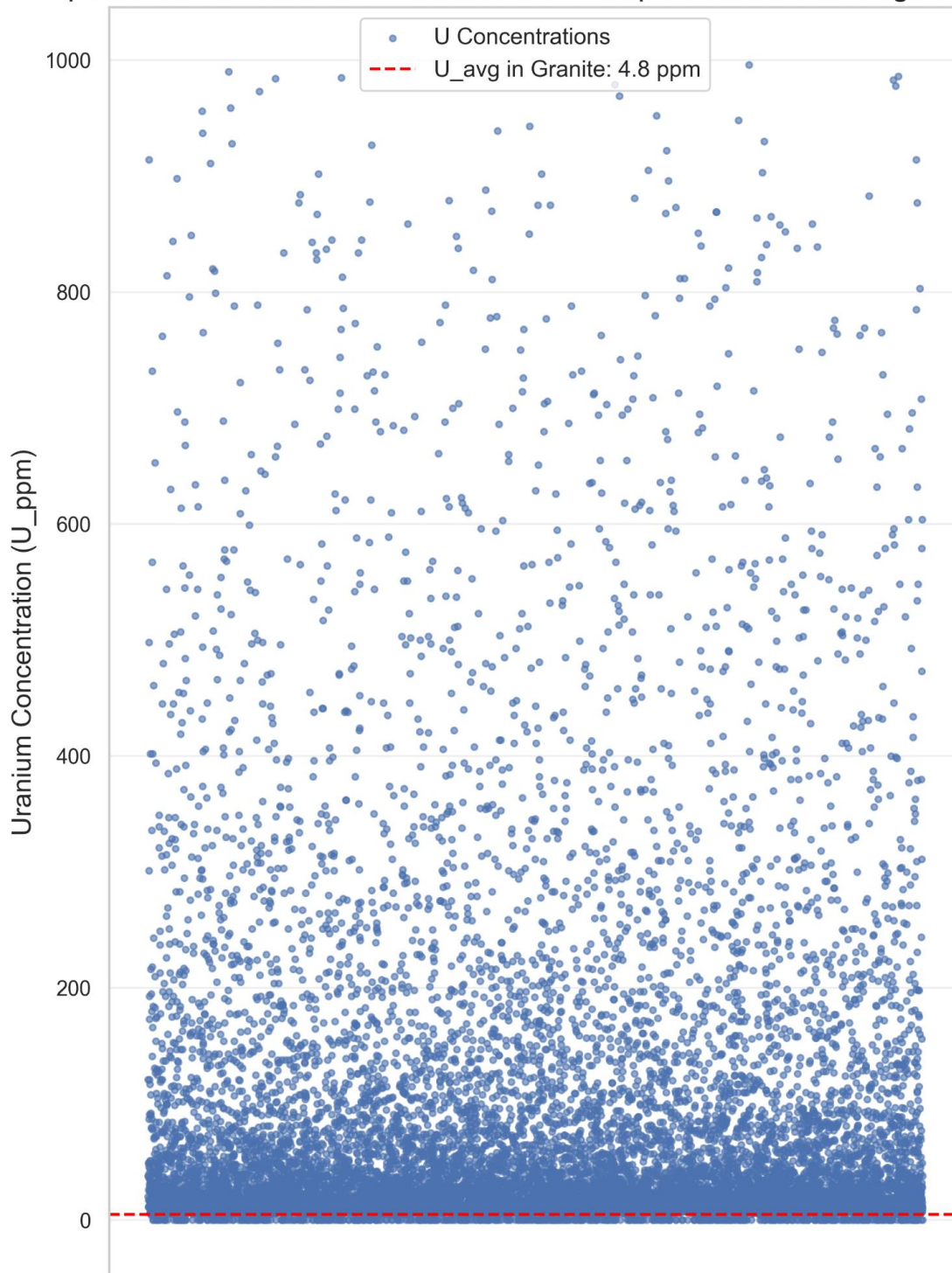


Figure 4 comparaison avec le granite

2. Comparaison avec la croûte terrestre (2.7 ppm)

Observation:

- **La majorité des échantillons** dépassent la concentration moyenne d'uranium dans la croûte terrestre.
- Cela montre un **enrichissement important** dans la zone étudiée.

Comparison of Uranium Concentrations in samples with the average in Earth's Crust

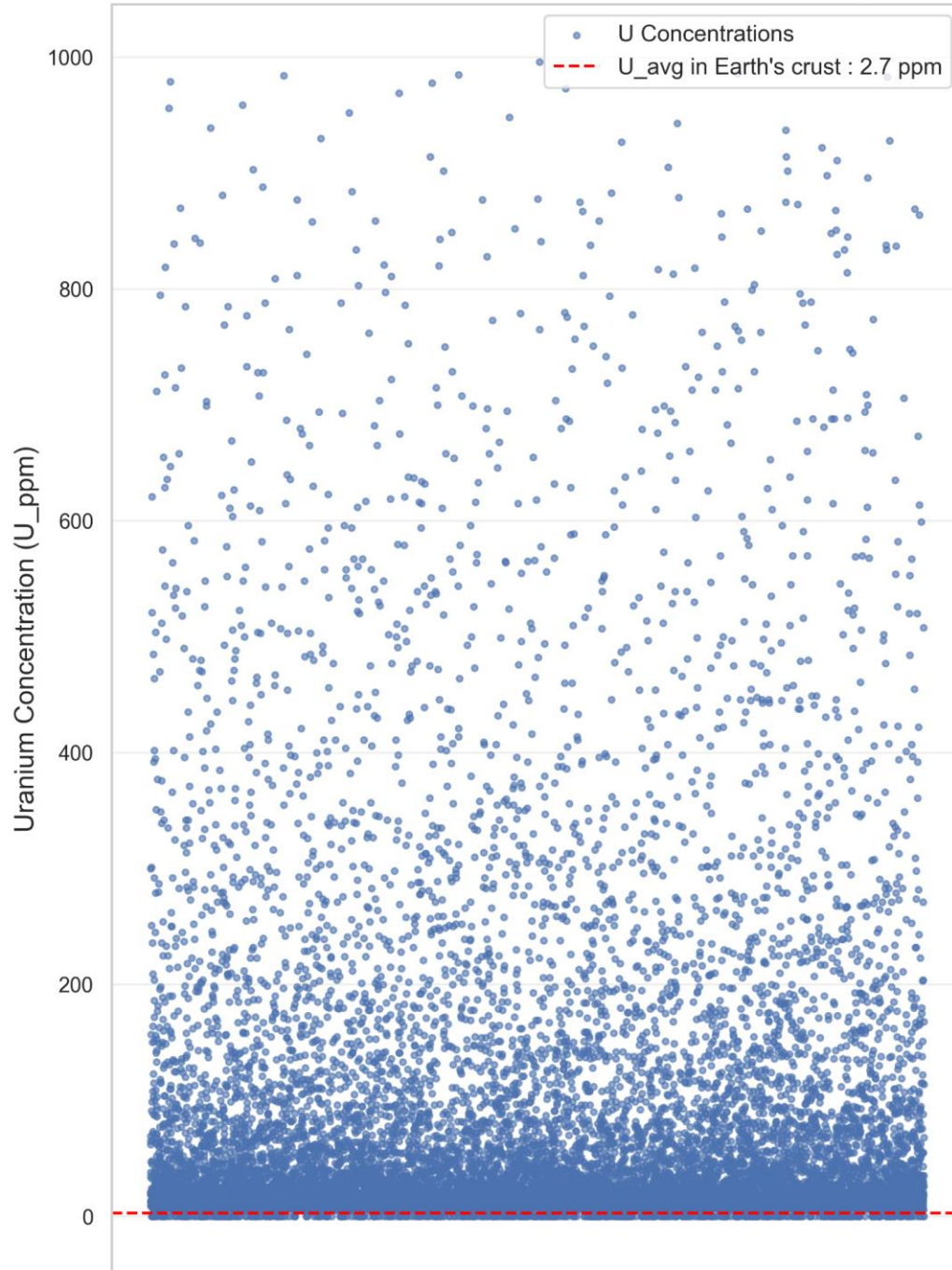


Figure 5 Comparaison des concentrations d'uranium avec la teneur moyenne dans la croûte terrestre

3. Comparaison avec le fond géochimique (moyenne + 2σ)

Observation:

- Un nombre important de la population est **bien au-dessus du seuil du fond géochimique**.
- Ces anomalies indiquent des **zones potentiellement minéralisées**.

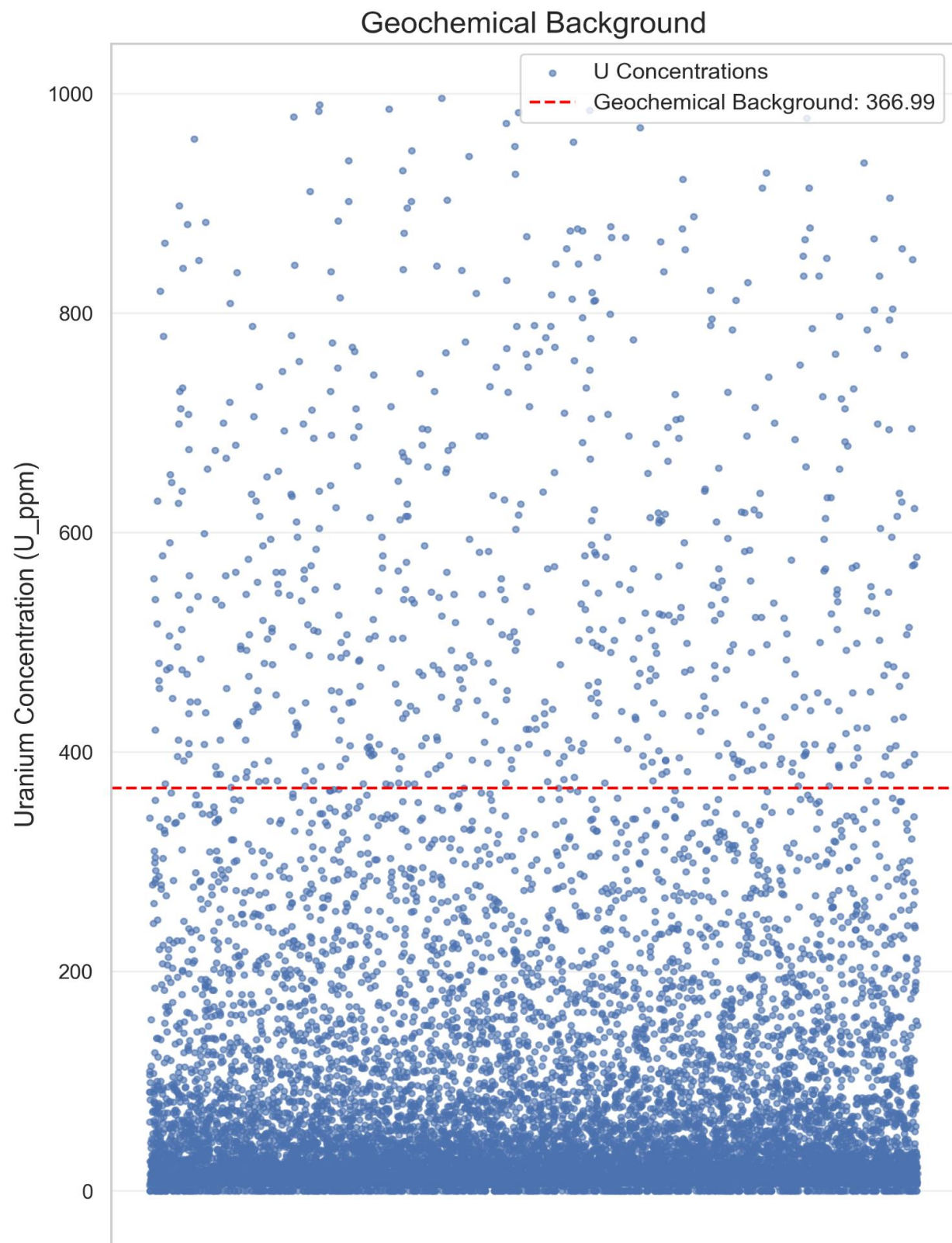


Figure 6 Comparaison des concentrations d'uranium avec le fond géochimique

4. Synthèse des résultats

- Les comparaisons montrent un enrichissement important en uranium.
- La majorité des échantillons dépassent la concentration moyenne du granite et de la croûte terrestre.
- Les anomalies géochimiques identifiées montrent une zone de grande potentiel.

Ces résultats indiquent que la région présente un potentiel important en uranium.

5. Conclusion et recommandations

L'étude menée dans le cadre du projet d'exploration géostatistique des régions d'Oued El Foula et Ain Sder a permis de développer une approche méthodologique complète intégrant l'analyse géochimique, la modélisation géostatistique et la visualisation interactive des données. Grâce à une base de données géologiques et géochimiques robuste, constituée notamment par les résultats des campagnes de forage d'Aura Energy, nous avons pu identifier des zones enrichies en uranium et comprendre les mécanismes d'altération et de concentration de cet élément.

Les recommandations issues de cette étude incluent l'optimisation des campagnes de forage en se concentrant sur les zones présentant des corrélations géochimiques élevées avec l'uranium, l'amélioration continue des modèles d'interpolation géostatistique pour une meilleure précision des prédictions, ainsi que l'intégration de nouveaux paramètres environnementaux pour affiner les estimations de ressources exploitables.

Synthèse des résultats :

L'analyse des corrélations chimiques a révélé des relations significatives entre l'uranium et certains éléments trace, tels que le thorium, le vanadium et le zirconium, suggérant des processus géochimiques spécifiques influençant la répartition de l'uranium. La modélisation géostatistique a permis d'optimiser l'interpolation des concentrations et d'identifier les zones de haute teneur en uranium, facilitant ainsi la prise de décision pour les futures explorations minières. De plus, la distinction entre les formations primaires (granitiques) et secondaires (colluviales) a permis d'affiner les stratégies d'exploration et de cibler les environnements les plus propices à une exploitation rentable.

Les résultats obtenus ont également mis en évidence l'importance de la qualité des données et de leur traitement, notamment en ce qui concerne les valeurs manquantes et la normalisation des mesures chimiques. L'intégration de techniques avancées d'analyse de données a contribué à une meilleure compréhension des structures géologiques complexes et à l'élaboration d'un modèle prédictif fiable pour les recherches futures.

Perspectives

En conclusion, cette étude a démontré l'efficacité d'une approche intégrée combinant exploration géochimique, analyse statistique et visualisation interactive pour l'optimisation de l'exploration minière. Les perspectives futures incluent l'amélioration continue des modèles prédictifs par l'incorporation de nouvelles données et l'exploitation d'algorithmes d'apprentissage automatique pour affiner les prédictions et maximiser les rendements de l'exploration. L'application de méthodes d'intelligence artificielle et de big data pourrait également renforcer la fiabilité des analyses et la rapidité des décisions stratégiques. Ainsi, cette méthodologie peut servir de référence pour des projets similaires visant l'identification et l'exploitation rationnelle des ressources minérales dans des environnements géologiques complexes.

