



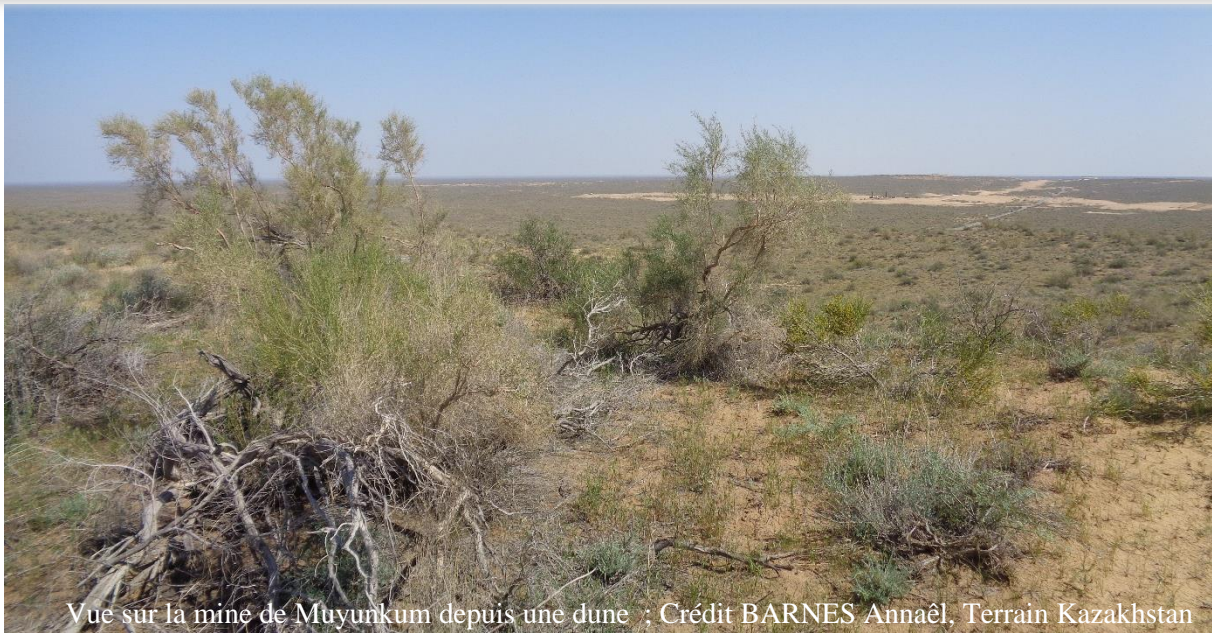
**ISTOM**

Ecole Supérieure d'Agro-Développement International



## Mémoire de fin d'études

Influence de la végétation sur le stock de carbone organique : application à la compensation de l'activité minière dans le district de Sozak au Kazakhstan



Vue sur la mine de Muyunkum depuis une dune : Crédit BARNES Annaël, Terrain Kazakhstan

**BEUGNON, Aymeric**

P108

Stage effectué à Montpellier, France et à Taukent, Kazakhstan  
du 10/03/22 au 01/09/22

Maîtres de stage : BARNES, Annaël et TAUGOURDEAU, Simon  
Tuteur pédagogique : TREBAOL, Loïc

## Résumé

D'après l'article 54 du code forestier kazakh de 2020, la Joint-Venture franco-kazakh minière Katco doit réaliser une plantation compensatoire basée sur une végétation arborée. Une possibilité est une participation à la « greenbelt » autour de la ville religieuse de Turkestan. Orano mining, détenant 51% de Katco, souhaite étudier l'indicateur stock de carbone des sols afin de prendre en compte le service écosystémique de régulation climatique dans les mesures compensatoires. Ce mémoire a pour objectif de présenter l'influence de la végétation sur les stocks de carbone organique dans les sols à différentes échelles (strates, unités paysagères, et composantes/caractéristiques de ces unités) afin d'émettre des recommandations sur les pratiques de compensation de l'activité minière du district de Sozak dans la région sud du Kazakhstan. Pour cela 99 prélèvements de sol et des mesures de végétation ont été mis en place sur 45 placettes de la zone d'étude pendant 1 mois. Les collectes, mesures et analyses en laboratoire ont permis la production des indicateurs : stock de carbone organique des sols, pH des sols, densité de ligneux, biomasse herbacée, nécromasse, diversité spécifique des herbacées et masse racinaire. Les tests statistiques de Kruskal-Wallis et Wilcoxon ont permis de comparer les stocks de carbone organique du sol entre les strates et entre les unités paysagères. Par la suite, une ACP a permis de mettre en évidence les composantes/caractéristiques des unités paysagères influençant le stock de carbone organique. Enfin, des tests de Kendall ont permis de comprendre la nature de la relation entre les différentes composantes des unités paysagères avec le stock de carbone organique du sol. Les résultats de ce travail mettent dans un premier temps en évidence des différences significatives du stock de carbone organique du sol entre unités paysagères mais non significatives entre les strates. En outre, les stocks sont influencés positivement par la densité de ligneux inférieurs à 50 cm ainsi que par la masse racinaire, et négativement par le pH des sols. Ce travail permet de mettre en avant l'importance des herbacées sur les stocks de carbone organique des sols de la zone d'étude et aussi la mise en exergue d'unités paysagères d'intérêt. La recommandation principale émise et issue des résultats est la préservation des stocks existants.

### **Mots clés :**

Stock de carbone organique des sols, végétation, strate, unité paysagère, compensation écologique, zone aride/semi-aride, Kazakhstan.

## Abstract

According to Article 54 of the 2020 Kazakhstan Forestry Code, the French-Kazakhstan mining joint venture Katco must create a compensatory plantation based on tree vegetation in the form of "greenbelt" around the religious city of Turkestan to offset its activities. Orano mining, which owns 51% of Katco, wishes to study the soil carbon stock indicator in order to take into account the ecosystem service of climate regulation in the compensatory measures. The objective of this thesis is to present the impact of vegetation on soil organic carbon stocks at different scales (strata, landscape units and the components/characteristics of these units) in order to make recommendations on compensation practices for mining activity in the Sozak district in the southern region of Kazakhstan. For this purpose, 99 soil samples and vegetation measurements were taken on 45 plots in the study area during 1 month. Soil organic carbon stock, soil pH, woody density, herbaceous biomass, necromass, herbaceous species diversity and root mass were collected, measured and analyzed in the laboratory. Kruskal-Wallis and Wilcoxon statistical tests were used to compare soil organic carbon stocks between strata and between landscape units. Subsequently, a PCA was used to identify the components/characteristics of the landscape units influencing the organic carbon stock. Finally, Kendall's tests were used to understand the nature of the relationship between the different components of the landscape units and the soil organic carbon stock. The results of this work show significant differences in soil organic carbon stock between landscape units but not significant for strata. In addition, the stocks are positively influenced by the density of woody plants below 50 cm as well as the root mass and negatively by the soil pH. This work highlights the importance of grasses on the organic carbon stocks of the soils in the study area and also highlights landscape units of interest. The main recommendation issued from the results is the preservation of existing stocks.

### **Key words:**

Soil organic carbon stock, vegetation, stratum, landscape unit, ecological compensation, arid/semi-arid zone, Kazakhstan.

## Resumen

Según el artículo 54 del Código Forestal de Kazajistán de 2020, la empresa minera conjunta franco-kazaja Katco debe realizar una plantación compensatoria a base de vegetación arbórea en forma de "cinturón verde" alrededor de la ciudad religiosa de Turquestán para compensar sus actividades. Orano mining, que posee el 51% de Katco, desea estudiar el indicador de reservas de carbono del suelo para tener en cuenta el servicio ecosistémico de regulación del clima en las medidas compensatorias. El objetivo de esta tesis es presentar el impacto de la vegetación en las reservas de carbono orgánico del suelo a diferentes escalas (estratos, unidades de paisaje y los componentes/características de estas unidades) para hacer recomendaciones sobre las prácticas de compensación de la actividad minera en el distrito de Sozak, en la región sur de Kazajistán. Para ello, se tomaron 99 muestras de suelo y se realizaron mediciones de la vegetación en 45 parcelas de la zona de estudio durante un mes. Se recogieron, midieron y analizaron en el laboratorio las reservas de carbono orgánico del suelo, el pH del suelo, la densidad leñosa, la biomasa herbácea, la necromasa, la diversidad de especies herbáceas y la masa radicular. Se utilizaron las pruebas estadísticas de Kruskal-Wallis y Wilcoxon para comparar las reservas de carbono orgánico del suelo entre estratos y entre unidades de paisaje. Posteriormente, se utilizó un ACP para identificar los componentes/características de las unidades de paisaje que influyen en las existencias de carbono orgánico. Por último, se utilizaron las pruebas de Kendall para comprender la naturaleza de la relación entre los distintos componentes de las unidades de paisaje y las existencias de carbono orgánico del suelo. Los resultados de este trabajo muestran diferencias significativas en las existencias de carbono orgánico del suelo entre las unidades de paisaje, pero no son significativas para los estratos. Además, las poblaciones se ven afectadas positivamente por la densidad de plantas leñosas por debajo de los 50 cm, así como por la masa radicular, y negativamente por el pH del suelo. Este trabajo pone de manifiesto la importancia de las hierbas en las reservas de carbono orgánico de los suelos de la zona de estudio y también destaca las unidades de paisaje de interés. La principal recomendación que se desprende de los resultados es la conservación de las reservas existentes.

### **Palabras clave :**

Existencias de carbono orgánico en el suelo, vegetación, estrato, compensación ecológica de la unidad de paisaje, zona árida/semiárida, Kazajistán.

## Table des matières

Résumé.....	2
Abstract .....	3
Resumen.....	4
Table des illustrations.....	7
Table des tableaux .....	8
Table des équations .....	9
Liste des abréviations et des sigles.....	10
Glossaire.....	11
Remerciement.....	12
1. Introduction .....	13
2. Présentation de la mission .....	14
2.1. Le CIRAD .....	14
2.2. Inscription de la mission dans le projet de thèse .....	14
2.3. Orano.....	14
2.4. Katco .....	15
2.5. Objectif de la mission.....	15
3. Contexte .....	16
3.1. Contexte géographique.....	16
3.1.1. Le Kazakhstan .....	16
3.1.2. La zone d'étude .....	17
3.2. Atténuer les impacts sur l'environnement : la séquence ERC.....	26
3.2.1. Eviter, réduire, compenser.....	26
3.2.2. Cadre juridique au Kazakhstan.....	27
3.2.3. Prise en compte des services écosystémiques dans la compensation .....	27
3.3. Le carbone des sols.....	28
3.3.1. Notion.....	28
3.3.2. Cycle du carbone organique des sols.....	29
3.3.3. Facteurs influençant le carbone organique des sols.....	30
4. Problématique et objectifs .....	31
5. Matériel et méthodes .....	32
5.1. Choix des indicateurs .....	32
5.1.1. Sol.....	32
5.1.2. Végétation .....	32
5.2. Stratégie d'échantillonnage .....	32
5.3. Mesures et prélèvement dans les placettes .....	34
5.3.1. Placette type .....	34

5.3.2.	Mesures et prélèvements de la végétation .....	35
5.3.3.	Prélèvements du sol.....	35
5.4.	Analyses des échantillons et des données .....	35
5.4.1.	Pendant le séjour au Kazakhstan .....	35
5.4.2.	A Montpellier .....	36
5.4.3.	Calcul des variables / indicateurs .....	36
5.4.4.	Analyses statistiques des données .....	37
6.	Résultats .....	38
6.1.	Description des résultats bruts.....	38
6.2.	Impact des strates de végétation et des unités paysagères.....	38
6.2.1.	Strates .....	39
6.2.2.	Unités paysagères .....	40
6.3.	Impact des composantes et caractéristiques des unités paysagères .....	41
7.	Discussion .....	46
7.1.	Stratégie d'échantillonnage .....	46
7.1.1.	Redéfinition des unités paysagères d'intérêt .....	46
7.1.2.	Les strates de végétation.....	48
7.2.	Indicateurs .....	48
7.2.1.	Des indicateurs pertinents non intégrés à l'étude .....	49
7.2.2.	Aller plus loin dans les mesures .....	50
7.3.	Résultats .....	50
7.4.	Recontextualisation / recommandations.....	51
8.	Conclusion.....	53
	Bibliographie.....	54
	Table des annexes.....	57
	Annexes.....	58
	Lexique des nom scientifiques .....	70



## Table des illustrations

Figure 1 : Situation géographique du Kazakhstan.....	16
Figure 2 : Localisation du district de Sozak et de la zone d'étude au Kazakhstan.....	17
Figure 3 : Diagrammes ombrothermiques des villes de Sozak et Tasty ( <a href="https://fr.climate-data.org/asiе/kazakhstan/south-kazakhstan-province-2231/">https://fr.climate-data.org/asiе/kazakhstan/south-kazakhstan-province-2231/</a> ).....	17
Figure 4 : Carte des types de sols de la zone d'étude.....	19
Figure 5 : Coupe géologique des bassins de Syr-darya et Chû-saryssu (BATIYEV Ruslan, 2009).....	20
Figure 6 : Carte des unités paysagères de la zone d'étude.....	21
Figure 7 : <i>Haloxylon</i> sp.....	22
Figure 8 : <i>Tamarix hispida</i> .....	23
Figure 9 : <i>Ephedra strobilacea</i> Bunge observé en Iran, République islamique d' par marylauredelahaarpe (sous licence <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/</a> ).....	23
Figure 10 : " <i>Calligonum</i> (Джузгун), Moscow University Herbarium" - <i>Calligonum</i> L. collecté en Ouzbékistan par Moscow State University (copyright is managed by Dr. Alexey P. Seregin) (sous licence <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> ).....	24
Figure 11 : " <i>Artemisia diffusa</i> Krasch. ex Poljakov (Полынь), Moscow University Herbarium" - <i>Artemisia diffusa</i> Krasch. ex Poljakov collecté en Ouzbékistan par Moscow State University (copyright is managed by Dr. Alexey P. Seregin) (sous licence <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> ).....	24
Figure 12 : Situation des mines de KATCO (KATCO, 2020).....	25
Figure 13: Schémas représentant le fonctionnement de la méthode d'extraction in-situ recovery (ORANO, 2021b).....	25
Figure 14 : Image d'un puit du site de South Tortuduk, Kazakhstan (ORANO, 2021b).....	26
Figure 15 : Schémas représentant les résultats théoriques de la séquence éviter, compenser, réduire (notre-environnement.gouv.fr, 2022).....	26
Figure 16 : Cycle du carbone organique du sol adapté de Cambou et al., 2020.....	29
Figure 17 : Carte représentant la répartition des placettes de prélèvement dans la zone d'étude.....	33
Figure 18 : Schémas de la prise de mesure au sein d'une placette type : cas avec et sans ligneux supérieur à 50 cm.....	34
Figure 19 : Graphique en boîte à moustache représentant le stock de carbone organique en fonction de la strate dans chaque unité paysagère.....	38
Figure 20 : Graphique en boîte à moustache représentant le stock de carbone organique en fonction de la strate.....	39
Figure 21 : Graphique en boîte à moustache représentant le stock de carbone organique en fonction de l'unité paysagère.....	40
Figure 22 : Cercle de corrélation des variables.....	41
Figure 23 : Nuage de point du stock de carbone organique en fonction de la densité de ligneux inférieur à 50 cm.....	43
Figure 24 : Nuage de point du stock de carbone organique en fonction de la masse racinaire avec coloration en fonction des unités paysagères.....	43
Figure 25 : Nuage de point du stock de carbone organique en fonction du pH.....	44
Figure 26 : Cercle de corrélation des variables et des individus.....	45
Figure 27 : Coupe d'une prairie permanente (P41).....	47
Figure 28 : Prélèvement de sols sur P29.....	47
Figure 29 : Stock de carbone en tC/ha dans différents biomes (Robert & Saugier, 2003).....	48
Figure 30 : Image mettant en évidence la profondeur d'une Armoise.....	49

## Table des tableaux

Tableau 1 : Valeurs moyenne des échantillons analysés .....	38
Tableau 2 : Tableau des p-value pour les différences entre strates issu du test de Kruskal Wallis.....	40



## Table des équations

Équation 1 : Le carbone des sols .....	28
Équation 2 : Le stock de carbone organique .....	28
Équation 3 : Aire d'une ellipse .....	36
Équation 4 : Aire d'influence d'une strate.....	36
Équation 5 : Composition d'une placette.....	37
Équation 6 : Surface d'influence de la strate sol nu.....	37
Équation 7 : Stock de carbone organique pour une placette.....	37

## Liste des abréviations et des sigles

ACP : Analyse en Composantes Principales

AMAP : botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations

CCOS : Concentration en Carbone Organique du Sol

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

COS : Carbone Organique du Sol

EPIC : Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

ISR : *In Situ Recovery*

NNL : *No Net Loss*

SCOS : Stock de Carbone Organique du Sol

SE : Service Ecosystémique

SELMET : Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux

UMR : Unité Mixte de Recherche

## Glossaire

- **Phréatophyte** : « Plante rejetant beaucoup d'eau par évaporation et ne pouvant se développer que sur les terrains humides, ou par le moyen d'un important système racinaire (aulne, saule, peuplier, tamaris, mimosacées, eucalyptus). [Dans les zones semi-arides, ces plantes contribuent à la désertification ; au contraire, dans les régions marécageuses elles peuvent contribuer à l'assainissement du terrain.] » (Larousse, 2022a)
- **Psammophyte** : « Se dit d'une plante habitant les régions sableuses » (Larousse, 2022b)
- **Service écosystémique** : « Les services écosystémiques sont les aspects des écosystèmes utilisés (activement ou passivement) pour produire du bien-être humain » (Fisher, Turner & Morling, 2009)
- **Xérophyte** : « Plante capable de vivre dans des régions habituellement sèches (déserts) ou dans des milieux physiologiquement secs (sols salés). [Selon le mode d'adaptation, on distingue les éphémérophytes, les sclérophytes, les cryptophytes et les plantes grasses.] » (Larousse, 2022c)

## Remerciement

Ce mémoire et ce stage n'auraient pu être réalisés sans l'aide de nombreuses personnes. Je tiens donc à remercier :

- Mme Barnes Annaël et M Taugourdeau Simon pour leur confiance et leur encadrement de qualité durant le stage.
- M Trébaol Loïc pour son tutorat de qualité.
- Mme Stokes Alexia, M Zhun Mao, M Maeght Jean-Luc, Mme Bazan Samantha, M Messad Samir et M Blanfort Vincent pour leurs conseils et expertises tout au long du stage.
- M Duteurtre Guillaume pour l'accueil au sein de l'UMR SELMET.
- Mme Rolland Isabelle pour son accompagnement et son aide pour le bon déroulement du stage.
- L'UMR AMAP et plus particulièrement M Fourtier Stéphane pour la mise à disposition du matériel de terrain et l'utilisation du laboratoire.
- Le laboratoire US analyse CIRAD pour leur expertise, leur professionnalisme, leurs conseils et leur rapidité.
- Plus largement le CIRAD pour leur accueil.

Je tiens aussi à remercier :

- Mme Rayot Véronique pour la relecture du mémoire.
- Mme Chabardes Maude pour l'encadrement administratif et sa rapidité.
- M Durand Matthieu et Guetté Adrien pour leur pédagogie au sein du domaine d'approfondissement Territoire risque et aménagement.
- Tous les professeurs et le personnel de l'ISTOM pour ces 5 années d'études.
- Mes proches pour leur soutien moral.

## Introduction

Le Kazakhstan est le premier producteur mondial d'uranium (Service Économique d'Astana, 2018). Dans le district de Sozak de la région sud du Kazakhstan, une partie des gisements uranifères est exploitée par méthode *in situ recovery* (ISR) par la Joint-Venture franco-kazakh Katco fondée par Orano et Kazatomprom en 1996 (KATCO, 2020).

Lors de l'implantation d'un projet d'aménagement comme un projet minier, une étude d'impact environnemental est réalisée afin de mesurer l'impact de la mise en place et de l'activité du site minier sur la biodiversité. Des mesures pour éviter (en amont), réduire (en amont et pendant) et compenser (pendant) les atteintes du projet sur la biodiversité y sont préconisées puis mises en place. L'objectif final de la compensation écologique est d'atteindre au moins un « *No Net Loss* » de biodiversité (Bennett & Gallant, 2017).

Au Kazakhstan, la compensation est encadrée par l'article 54 du code forestier de 2020. Les compagnies minières uranifères doivent réaliser une plantation compensatoire sur deux fois la surface du permis demandé dans les trois premières années du développement du projet. La compensation est donc basée sur une végétation arborée. Actuellement, pour la compensation, KATCO et d'autres compagnies devant compenser leurs activités sont incitées à participer à une plantation de « *greenbelt* » autour de la ville religieuse de Turkestan (BARNES Annaël, 2022a). Dans le cadre de ces mesures compensatoires Orano mining souhaite connaître la capacité de stock de carbone organique des sols et la possibilité de prendre en compte le service écosystémique de régulation climatique. D'après Jobbágy & Jackson, (2000) et Quideau *et al.*, (2001), la végétation produit justement une grande partie du carbone des sols par la décomposition de la litière et des racines.

Dans ce mémoire, l'étude de l'influence de la végétation sur les stocks de carbone organique dans les sols à différentes échelles (strates, unités paysagères, et les composantes/caractéristiques de ces unités) est présentée.

Afin de traiter ce sujet, des prélèvements de sols ainsi que des mesures de végétation sont réalisés sur le terrain sur des placettes d'inventaire. Par la suite, des analyses en laboratoire ont permis d'obtenir le stock de carbone organique des sols ainsi que le pH eau. Les mesures de végétation ont donné lieu à des indicateurs grâce à des calculs de densité, d'aire d'influence, et de moyenne par placettes. Les analyses statistiques à partir des indicateurs permettront d'évaluer l'influence de la végétation, des strates et des unités paysagères sur le stock de carbone organique des sols.

Dans un premier temps, une présentation détaillée de la mission est présentée. Ensuite, le contexte du pays et de la zone d'étude est mis en avant, et le concept de la compensation écologique et sa mise en application au Kazakhstan sont détaillés. Après une présentation de la problématique générale et des objectifs de la mission, les matériels et méthodes de l'étude sont expliqués, des prélèvements et mesures sur le terrain au analyses statistiques pour traiter de notre problématique. Les résultats issus de ces méthodes sont décrits et laissent place à la discussion de la méthodologie et des résultats. Finalement, la discussion intègre des recommandations pour la prise en compte du stock de carbone dans les sols dans le cadre de la compensation au Kazakhstan et donnera suite à une conclusion générale de la mission.

## Présentation de la mission

### 2.1. Le CIRAD

Le CIRAD est un organisme français de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes. Il fut fondé en 1984 sous le statut d'EPIC (Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial) par la fusion d'instituts techniques et de recherche agronomique tropicale. Il est sous la tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. Il se compose de 29 unités de recherche travaillant dans une cinquantaine de pays (CIRAD, 2022).

Le projet est en lien avec deux unités. L'UMR (Unité Mixte de Recherche) Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux (SELMET) travaille sur l'accompagnement des élevages pastoraux et des exploitations mixtes familiales en zones tropicales et méditerranéennes. Elle se compose de professionnels de la recherche issue de 5 départements rattachés au CIRAD, à l'INRAE et à l'Institut Agro Montpellier (« Présentation / L'unité - Unité mixte de recherche Système d'élevage méditerranéens et tropicaux (SELMET) », 2022).

L'UMR Botanique et modélisation de l'architecture des plantes et des végétation (AMAP) articule ses recherches autour de l'acquisition de connaissances sur les plantes et les écosystèmes. On y retrouve des professionnels du CIRAD, du CNRS, de l'INRAE, de l'IRD et de l'université de Montpellier (« UMR AMAP - botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations », 2022).

### 2.2. Inscription de la mission dans le projet de thèse

Cette mission s'inscrit dans le projet de thèse de Mme BARNES Annaël : « Accompagner la compensation écologique d'implantations minières dans les zones arides d'Asie Centrale : une approche en termes de services écosystémiques ». La thèse est portée par l'UMR SELMET et co-dirigée par l'UMR AMAP. Elle est financée par le commanditaire et partenaire Orano mining.

L'objectif de la thèse est de proposer une méthode permettant d'intégrer les services écosystémiques dans la compensation écologique. C'est dans ce cadre que des entretiens dans le district de Sozak au Kazakhstan ont été réalisés en 2021, afin de recenser les services écosystémiques (SE) perçus par les habitants et d'évaluer les préférences et les importances de ces SE. En plus de ces services identifiés par l'implication des acteurs locaux, l'entreprise Orano souhaite évaluer le service de régulation du climat global.

### 2.3. Orano

Le groupe Orano SA se divise en sous-groupes qui s'occupent d'une ou plusieurs activités autour du cycle nucléaire (mine, chimie et enrichissement, recyclage, emballage nucléaire et services, démantèlement et services, projets, médecine nucléaire) (ORANO, 2021a).

La production de l'année 2020 d'Orano mining s'élève à 6 529 t d'uranium avec un chiffre d'affaires de 3,7 milliards d'euros (ORANO, 2021b). En 2021, le groupe produisait sur 4 sites miniers répartis au Niger, au Canada et au Kazakhstan.

## 2.4. Katco

Au Kazakhstan, le gisement est exploité par la Joint-Venture franco-kazakhe Katco. Katco est une co-entreprise fondée par Orano et la société nationale kazakhe Kazatomprom en 1996 et détenue à 51 % par Orano (KATCO, 2020). En 2020, le site a produit 2 833 t d'uranium soit 43% de la production total d'Orano mining.

## 2.5. Objectif de la mission

L'objectif de la mission est l'évaluation d'indicateurs des SE d'intérêt liés aux sols pour les habitants et pour l'entreprise. Pour les populations locales, les SE d'intérêt des sols sont le contrôle de l'érosion et la régulation de la qualité des sols, et le souhait d'Orano est l'évaluation de l'indicateur stock de carbone dans les sols. Ces évaluations sont réalisées dans différentes unités paysagères et en fonction de la végétation. La mission se déroule du 10 mars 2022 au 1er septembre 2022 avec 1 mois de terrain au Kazakhstan en mai du 04 mai au 04 juin 2022.

Dans ce mémoire, il sera présenté l'étude des stocks de carbone organique et l'influence de la végétation sur ceux-ci à différentes échelles (strate, densité de végétation, unité paysagère) afin de mettre en évidence les zones à enjeux et les types de végétation favorisant ces stocks.



## Contexte

### 3.1. Contexte géographique

#### 3.1.1. Le Kazakhstan

Le Kazakhstan est un pays d'Asie Centrale d'une superficie de 2 724 900 km<sup>2</sup>. Il est frontalier avec la Russie au nord et avec le Kirghizstan, l'Ouzbékistan, ainsi que le Turkménistan au sud. La mer Caspienne borde le pays à l'ouest et la Chine est frontalière à l'est (Figure 1). Les langues les plus communément utilisées sont le kazakh et le russe. La population en 2021 était de 18 917 200 millions d'habitants dont 59 % en zone urbaine. Le pays compte une densité de 6 habitants au kilomètre carré. Les deux plus grandes villes sont la capitale Astana (1 136 000 habitants) et Almaty (1 916 822 habitants), l'ancienne capitale (Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, 2022).

Le pays est le premier producteur mondial d'uranium avec 40 % de production en 2017. Il représente aussi la deuxième réserve mondiale d'uranium (13 %) (Service Économique d'Astana, 2018).



Source : ESRI  
SCR : WGS 84 EPSG: 4326  
Date : 17/09/2022  
Auteur : BEUGNON Aymeric

Figure 1 : Situation géographique du Kazakhstan

### 3.1.2. La zone d'étude

#### 3.1.2.1. Localisation

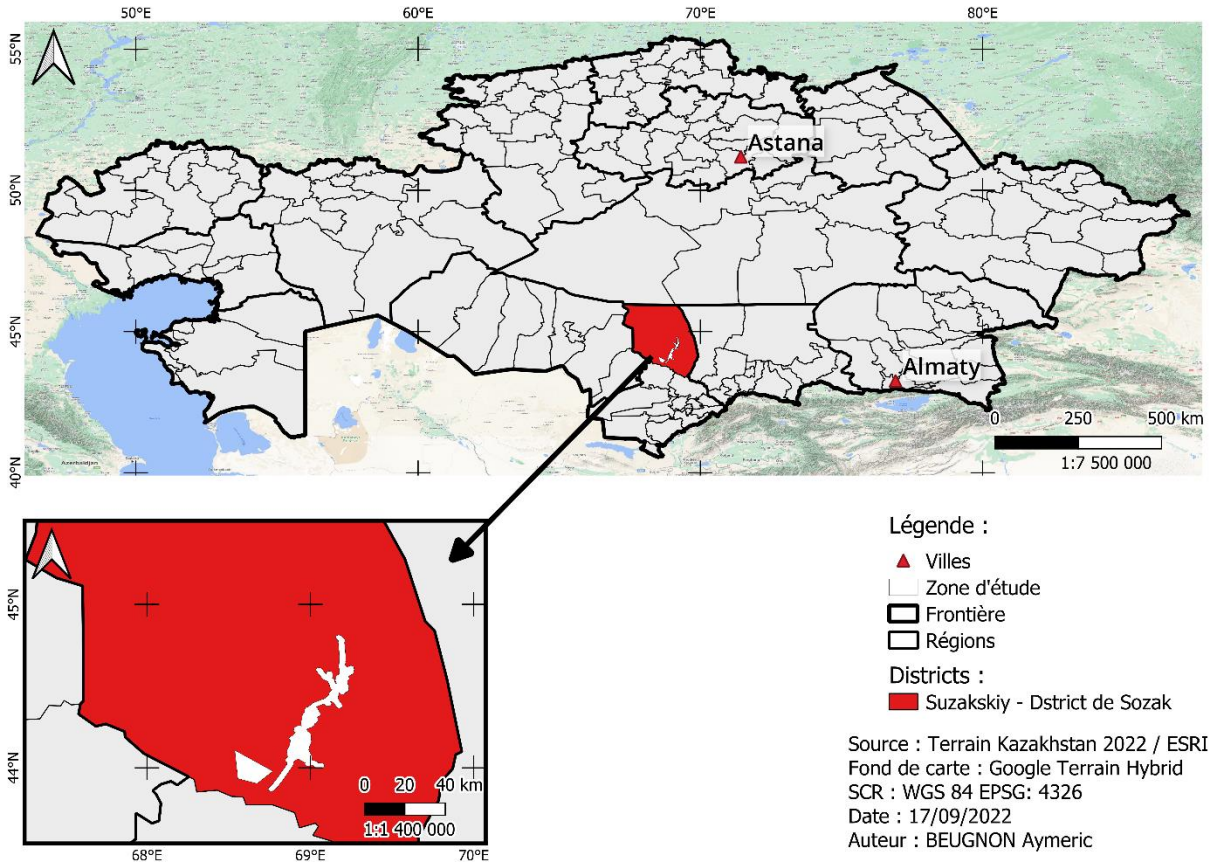


Figure 2 : Localisation du district de Sozak et de la zone d'étude au Kazakhstan

La mission se déroule dans le district de Sozak (Figure 2) dans la région sud du Kazakhstan sur un transect entre les villages de Taukent, au sud de la zone d'étude et Tasty, au nord.

#### 3.1.2.2. Climat

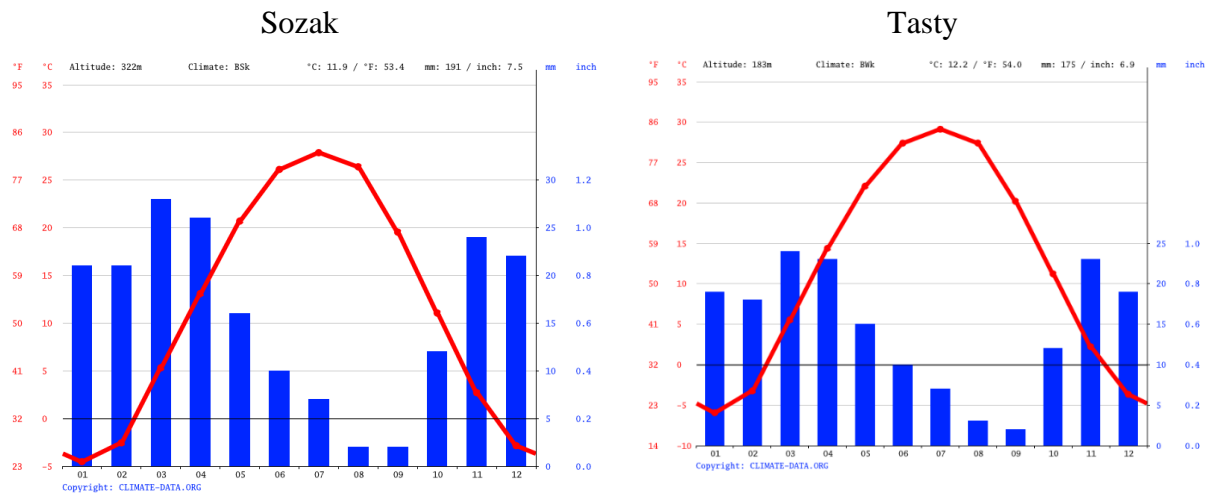


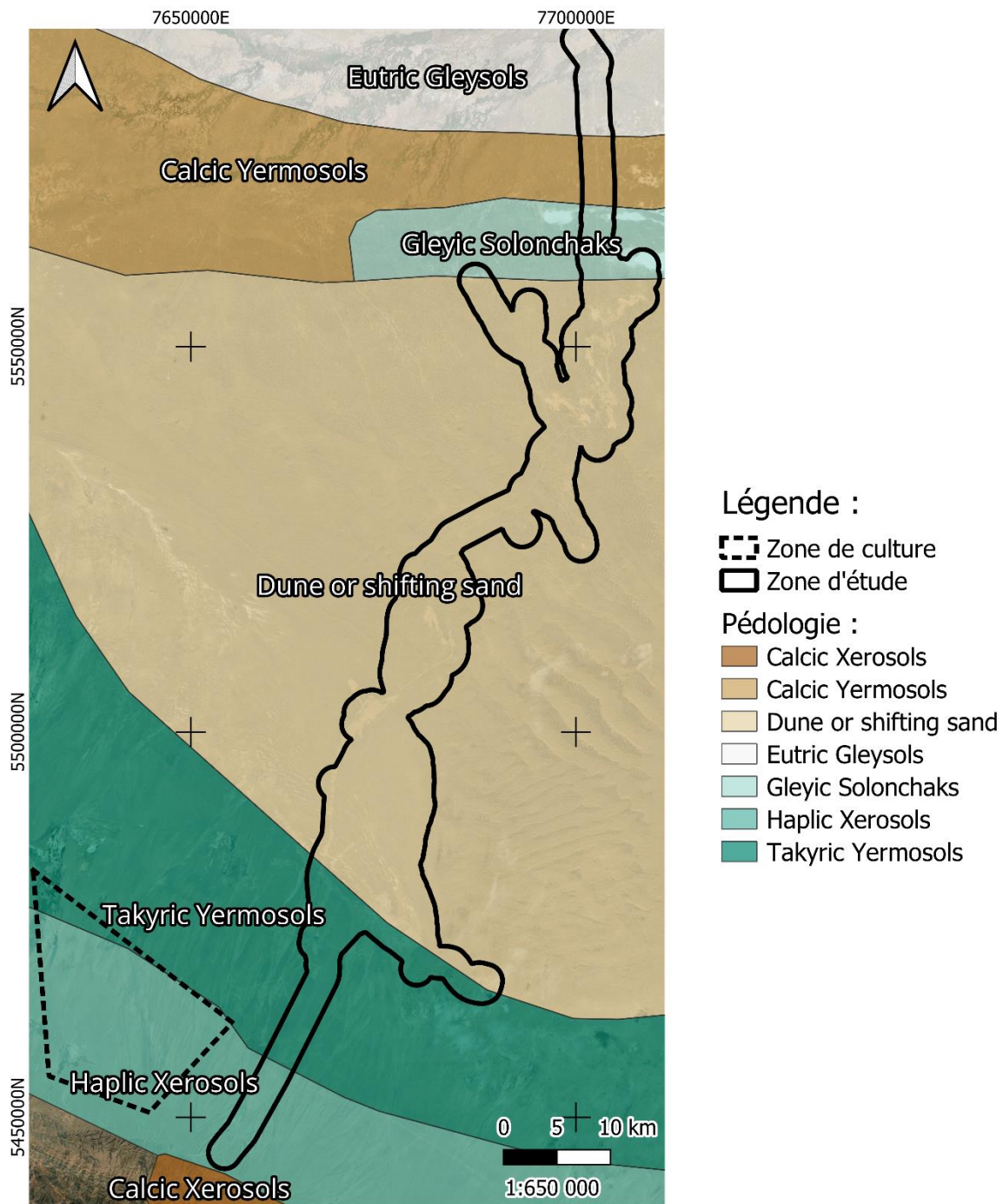
Figure 3 : Diagrammes ombrothermiques des villes de Sozak et Tasty (<https://fr.climate-data.org/asiе/kazakhstan/south-kazakhstan-province-2231/>)

La région sud du Kazakhstan est une zone à climat semi-aride (Figure 3). La ville de Sozak, située le long des montagnes au sud du district de Sozak présente des températures moyennes maximales de 33°C et de -8°C en minimale avec des précipitations annuelles moyennes de 191 mm. La ville de Tasty au nord de la zone d'étude a des températures moyennes plus contrastées avec 35°C en maximale contre -10°C en minimale et des précipitations plus faibles de l'ordre de 175 mm en moyenne annuellement. D'après la classification de Köppen et Geiger, le nord de la zone d'étude possède un climat désertique sec et froid (BWk), tandis que le sud de cette zone est un climat de steppe sec et froid (BSk) (« Climat Sozak: Pluviométrie et Température moyenne Sozak, diagramme ombrothermique pour Sozak - Climate-Data.org », 2022).

### 3.1.2.3. Pédologie

Selon l'Harmonized World Soil Database (HWSD), la zone d'étude est composée de sept types de sol (Figure 4). Les types de sols présents dans notre zone d'étude sont d'après l'IUSS Working Group WRB (2015) :

- Au nord, et proche de la rivière Chu, les sols de type eutrique gleysol sont saturés par la nappe phréatique pendant une certaine période, ce qui permet l'installation de conditions réductrices. En surface, il peut être de couleur rougeâtre, brunâtre, jaunâtre et grisâtre bleuâtre à l'intérieur. La terminaison eutrique signifie un taux de saturation  $S/CEC > 50\%$ .
- Les yermosols sont des sols à classe textural de type loam présentant des réseaux polygonaux de fentes de dessiccation. Notre zone d'étude comporte des yermosols calciques présentant un horizon calcique et des yermosols takyriques, avec une surface à texture épaisse.
- Les gleyiques solonchaks présentant de hautes concentrations en sel soluble. Cette formation peut se distinguer : les solonchaks externes avec une accumulation de sel en surface due à une nappe perchée, et les solonchaks internes avec présence de sel sous la surface lorsque la nappe n'atteint pas la surface. Ils présentent souvent des propriétés gleyiques avec conditions réductrices.
- Au centre de la zone d'étude, la zone sableuse est composée de dunes de différentes tailles.
- Au pied des montagnes, au sud de la zone d'étude, les xérosols ont une évolution pédologique limitée avec une vie biologique du sol active pendant quelques mois par an. Ces sols sont répandus dans les régions subdésertiques et présentent peu de matières organiques. Dans notre cas, il s'agit d'un xérosol haplique (typique). Plus au sud, les xérosols présentent un horizon calcique mais n'ont pas été inclus dans la zone d'étude.

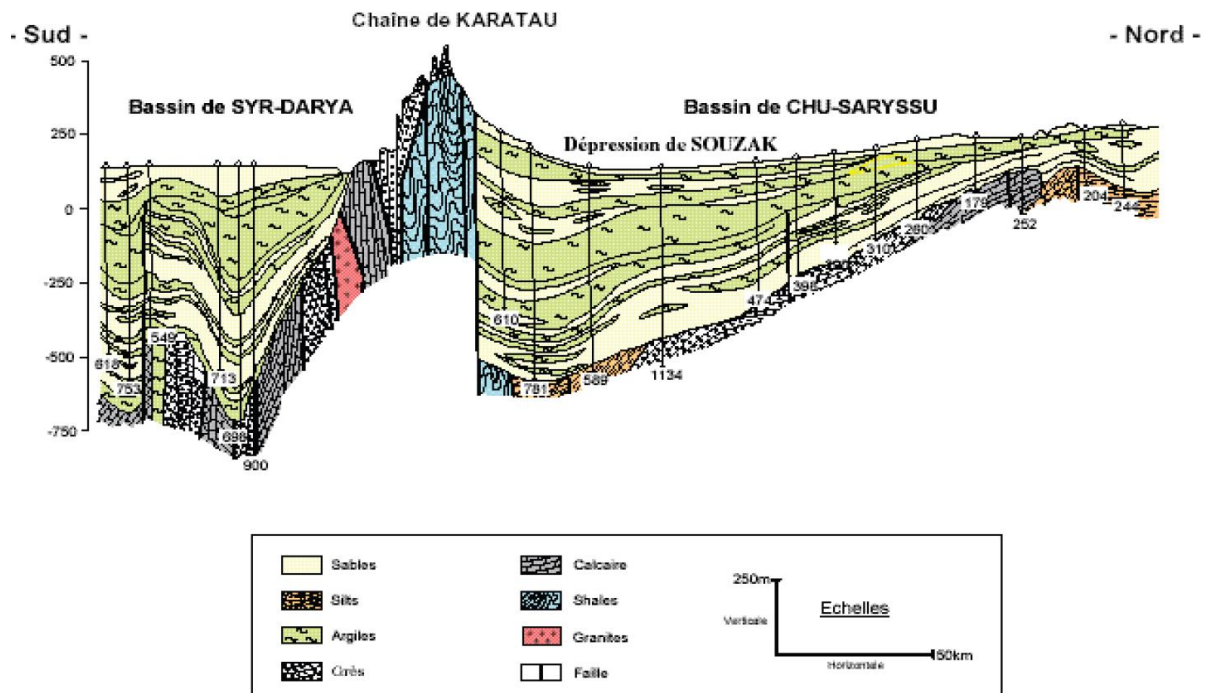


Sources : Harmonized World Soil Database (HWSD)  
 Fond de carte : ESRI Satellite (ArcGIS/World\_Imagery)  
 SCR : WGS 84 / UTM zone 42N EPSG: 32642  
 Date : 15/09/2022  
 Auteur : BEUGNON Aymeric

Figure 4 : Carte des types de sols de la zone d'étude



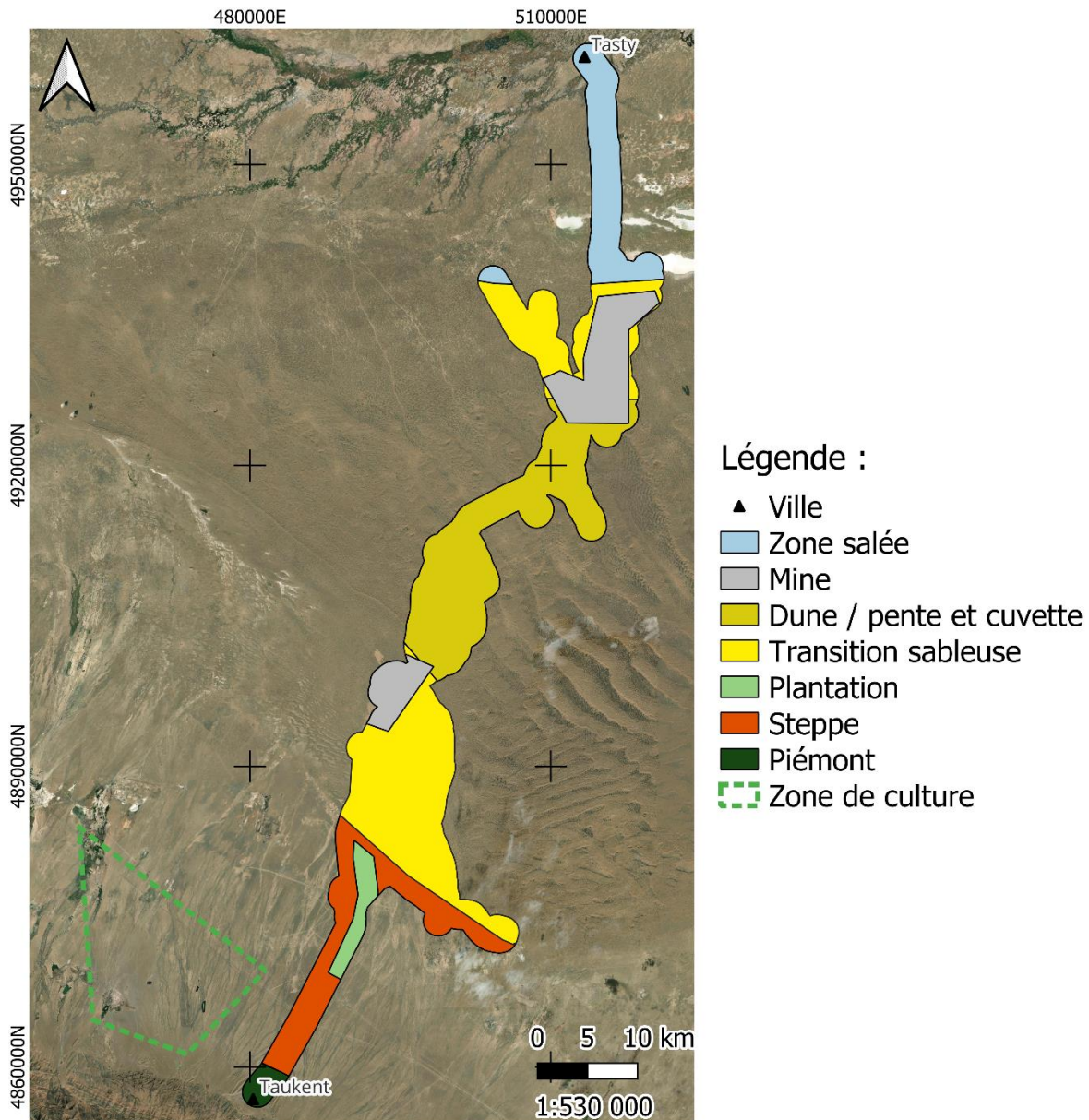
### 3.1.2.4. Géologie



La dépression de Sozak est composée de dunes sableuses et d'une plaine argilo-limoneuse issue des dépôts alluviaux de la rivière Chu. Ces dépôts sont des successions de sables et d'argiles sur un socle paléozoïque composé de calcaire, grès, schistes et de silt (Figure 5) (Annexe 1) (BATIYEV Ruslan, 2009).

### 3.1.2.5. Unités paysagères

La zone d'étude est découpée par plusieurs unités paysagères (Figure 6). Elles ont été définies dans un premier temps grâce aux entretiens réalisés entre juin et juillet 2021 par A. Barnes avec les habitants de plusieurs villages du district, puis précisées grâce à des images satellites. Enfin, en arrivant sur le terrain, nous avons pu les préciser plus finement selon leurs différentes caractéristiques (Annexe 2).



Source : Terrain Kazakhstan 2022  
 Fond de carte : ESRI Satellite (ArcGIS/World\_Imagery)  
 SCR : WGS 84 / UTM zone 42N EPSG: 32642  
 Date : 08/09/2022  
 Auteur : BEUGNON Aymeric

Figure 6 : Carte des unités paysagères de la zone d'étude

- Le piémont est une zone sans arbres/arbustes qui sert pour le pâturage, notamment pour les habitants de Taukent et autres villages des piémonts. Il se situe au pied des montagnes de Karatau au sud de la zone d'étude et borde le village de Taukent. C'est l'unité paysagère naturelle la plus humide avec une forte richesse spécifique.
- La steppe ne présente pas d'arbre non plus. Elle sert aussi de pâturage. Contrairement au piémont, cette unité est sèche avec moins de diversité spécifique et des plantes au développement limité.
- Dans les piémonts et la steppe sont cultivées des plantes fourragères pour l'alimentation hivernale du bétail, souvent irriguées (zone de culture dans la Figure 6).

- La plantation se situe dans la steppe. Les arbres plantés sont des *Haloxylon ammodendron* plantés en ligne. Peu d'herbacées sont présentes au sol. Parfois, des chameaux et des chevaux peuvent y pâturer.
- La transition sableuse est au nord de la steppe et au sud de la zone salée, et borde en son sein la zone sableuse. C'est une unité sableuse elle aussi mais avec peu de reliefs dunaires. Elle est composée de différentes strates de végétation : arbres/arbustes, herbacées pérennes et annuelles. Elle sert de pâturage une partie de l'année.
- La zone sableuse, bordée par les transitions sableuses, est composée de deux sous unités. Les hauts de dunes et pentes avec des arbres et arbuste et les cuvettes sans arbre. Il s'agit d'un pâturage important pour la saison hivernale.
- La mine est située dans la zone sableuse. Cette unité se caractérise par une faible végétation. Elle est essentiellement composée de puits d'exploitation du minerai uranifère et de pistes.
- Au sud du village de Tasty et donc au nord de la zone d'étude, la zone salée est composée d'une végétation halophile, différente du reste de la zone d'étude. L'espèce ligneuse majoritaire est le *Tamarix* spp.. Comme la majorité des autres unités, il s'agit aussi d'une zone de pâturage, plutôt pour les troupeaux des habitants de Tasty et autres villages au bord de la rivière Shu.

Les plantations seront traitées comme un état renaturé et la mine comme un état à restaurer.

Les principales plantes ligneuses de la zone d'étude sont :

- *Haloxylon persicum* et *Haloxylon ammodendron* (Figure 7) sont des arbustes de 2 à 5 m de haut de la famille des *Chenopodiaceae*. Ces deux espèces se retrouvent majoritairement sur la zone sableuse du fait de leurs caractéristiques psammophyte et ont un système racinaire atteignant en moyenne 8 m (Gintzburger *et al.*, 2003).



Figure 7 : *Haloxylon* sp.



- *Tamarix* sp. (Figure 8) est un arbre buissonnant atteignant 4 à 6m de haut avec un système racinaire profond (8m), de la famille des *Tamaricaceae*. On le retrouve essentiellement dans les zones saline en particulier sur des solonchak grâce à ces capacités halo-phréatophyte (Gintzburger *et al.*, 2003).



Figure 8 : *Tamarix* sp.

- *Ephedra* sp. (exemple de l'espèce *Ephedra strobilacea* en Figure 9) est une espèce psammo-xérophyte de la famille des *Ephedraceae* souvent présente avec *Haloxylon* sp. C'est un buisson pouvant atteindre 2m en hauteur et 15m en profondeur racinaire.



Figure 9 : *Ephedra strobilacea* Bunge observé en Iran, République islamique d'Iran par marylauredelahaarpe (sous licence <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

- *Calligonum* sp. (Figure 10) de la famille des *Polygonaceae* est un buisson entre 35 cm et 4 m de hauteur.

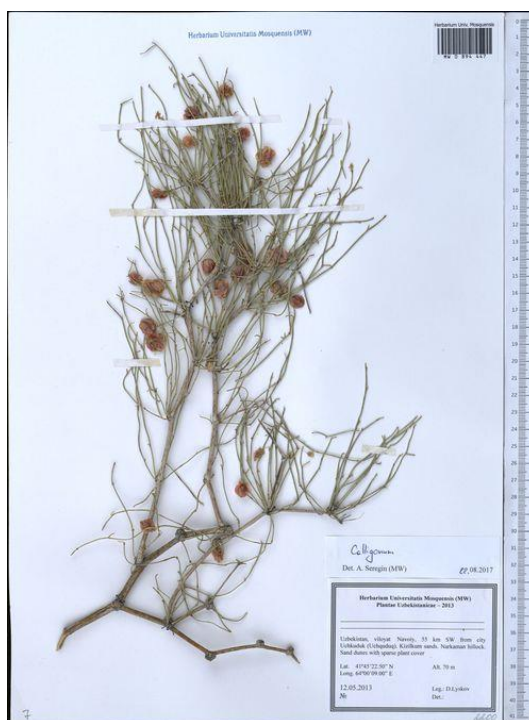


Figure 10 : "*Calligonum* (Джузгун), Moscow University Herbarium" - *Calligonum* L. collecté en Ouzbékistan par Moscow State University (copyright is managed by Dr. Alexey P. Seregin) (sous licence <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

- *Artemisia* sp. (exemple d'*Artemisia diffusa* en Figure 11) est une pérenne de la famille des *Asteraceae* mesurant entre 30 et 50 cm de hauteur. Cette espèce xéro-gypsophile est présente sur toutes la zone d'étude.



Figure 11 : "*Artemisia diffusa* Krasch. ex Poljakov (Польня), Moscow University Herbarium" - *Artemisia diffusa* Krasch. ex Poljakov collecté en Ouzbékistan par Moscow State University (copyright is managed by Dr. Alexey P. Seregin) (sous licence <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### 3.1.2.6. Mines d'uranium du district de Sozak

Sur le permis de KATCO, on distingue les sites de Muyunkum et Tortkuduk (Figure 12) qui sont exploités par la méthode de récupération ISR (ou in sity leach), et le site de South Tortkuduk en cours d'exploration (ORANO, 2021b).



Figure 12 : Situation des mines de KATCO (KATCO, 2020)

La méthode d'extraction d'une mine dépend de sa faisabilité technico-économique. Les mines à ciel ouvert sont pour les gisements peu profonds. À l'inverse, les mines souterraines sont pour des gisements plus profonds. L'ISR est mené par injection d'une solution de lixiviation (acide ou basique) par des puits dans une roche perméable située entre deux formations imperméables. La solution dissout l'uranium puis est pompée jusqu'à l'usine pour extraire l'uranium (Figure 13, Figure 14) (ORANO, 2021b).

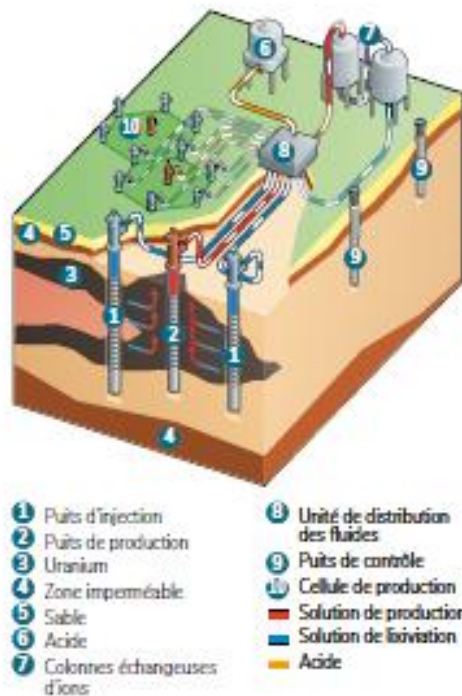


Figure 13: Schémas représentant le fonctionnement de la méthode d'extraction in-situ recovery (ORANO, 2021b)





Figure 14 : Image d'un puit du site de South Tortuduk, Kazakhstan (ORANO, 2021b)

## 3.2. Atténuer les impacts sur l'environnement : la séquence ERC

### 3.2.1. Eviter, réduire, compenser

La séquence d'éviter, réduire, compenser intervient sur des projets pouvant impacter l'environnement, comme les projets miniers. L'objectif de cette séquence est de n'avoir aucune perte nette (« *No Net Loss* » : NNL) de biodiversité voire un gain net de biodiversité (Figure 15) (notre-environnement.gouv.fr, 2022).

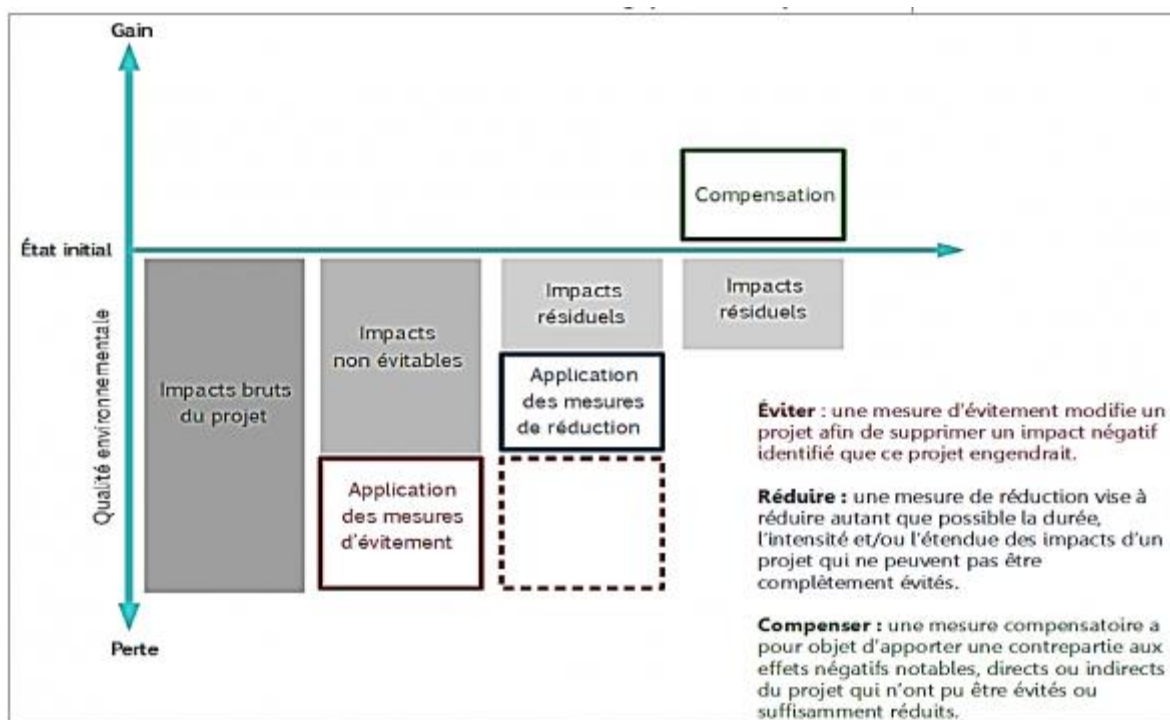


Figure 15 : Schémas représentant les résultats théoriques de la séquence éviter, compenser, réduire (notre-environnement.gouv.fr, 2022)

Cela intervient dans un premier temps par l'évitement des incidences du projets sur l'écosystème, en cherchant des alternatives en amont du projet, géographiques, techniques et/ou temporelles. Ce qui n'a pas pu être évité est ensuite réduit au maximum par des mesures géographiques en récupérant et transférant une partie du milieu naturel vers des espaces dédiés, techniques avec la mise en place de dispositif de lutte contre l'érosion des sols lors des travaux, et/ou temporelles par l'adaptation de la période des travaux (CGDD & CEREMA, 2018). Enfin la compensation intervient sur ce qui ne peut être évités ou réduit. Elle peut prendre plusieurs

formes selon la réglementation et les porteurs de projets : restauration d'habitats dégradés, protection d'écosystèmes, etc. Puisque la finalité est d'atteindre au moins un NNL de biodiversité, les impacts « résiduels » du projet doivent être contrebalancés par les mesures compensatoires mises en place (Bennett & Gallant, 2017).

### 3.2.2. Cadre juridique au Kazakhstan

La compensation est entrée dans la loi kazakhe en 2020 avec l'article 54 du code forestier du Kazakhstan:

*"Uranium mining by underground borehole leaching on the lands of the state forest fund shall be carried out without their transfer to lands of other categories with further reclamation of disturbed land plots and their transfer to the forest owner in the manner determined by the authorized authority. Subsoil users, when using plots of the state forest fund for uranium mining by the method of underground borehole leaching, shall be obliged, during the first three years of subsoil development, to make compensatory plantings of forest plantations in double the size of the area used and their maintenance before transferring to a forested area."*

Plus précisément, elle se déroule sur deux grandes phases. La plantation d'arbres doit être réalisée dans les 3 ans à partir du début d'un projet. Dans le cas de Katco, l'espèce majoritaire est le saxaul, planté avec 20% d'autres espèces ligneuses. Ensuite l'entreprise doit entretenir la plantation pendant quatre ans. A l'âge de cinq ans, la plantation est contrôlée et doit avoir un succès de 75% soit entre 1000 et 1500 arbres de plus d'un mètre par hectare. Les différentes décisions, et notamment celui du lieu, reviennent au gouvernement et surtout aux *Akimats* de régions (administrations). Les choix des lieux de compensations sont réfléchis selon des intérêts socio-économiques et politiques, mais aussi selon l'état écologique des zones potentielles de compensation (BARNES Annaël, 2022b).

Pour l'Etat, l'objectif est de planter 1 millions d'hectares de « *green belt* » autour de zones à enjeux environnementaux, comme la mer d'Aral, ou à enjeux sociaux, politiques et religieux, comme certaines villes telle qu'Astana, la capitale, ou Turkestan, le centre religieux du pays.

Les premières compensations par plantation à grande échelle ont d'ailleurs eu lieu autour d'Astana, puis de la mer d'Aral. Ces deux plantations ont été financées par des entreprises concernées par la compensation. Aujourd'hui, l'objectif du pays est de planter une *green belt* autour de la ville religieuse de Turkestan, avec 11 400 hectares à planter potentiellement avec des financements de Katco (BARNES Annaël, 2022a).

### 3.2.3. Prise en compte des services écosystémiques dans la compensation

En 2012, le *Business and Biodiversity Offset Programme* (BBOP) dévoile une norme internationale pour la compensation écologique, et les services écosystémiques y sont théoriquement pris en compte (Business and Biodiversity Offsets Programme (BBOP), 2012). Bennett et Gallant (2017) soutiennent aussi la prise en compte des services écosystémiques dans la compensation écologique dans leur rapport « *State of Biodiversity Mitigation, 2017, Markets and Compensation for Global Infrastructure Development* ».

### 3.3. Le carbone des sols

#### 3.3.1. Notion

Il est important de faire la distinction entre plusieurs termes liés au carbone des sols. La matière organique du sol est majoritairement composée de matières organiques mortes issues de la végétation, mais aussi d'organismes vivants : la faune du sol. Le carbone du sol comporte deux catégories :

- Le carbone inorganique (Cinorg) est principalement du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) mais peut aussi être du carbonate de magnésium ( $\text{MgCO}_3$ ), ou de fer ( $\text{FeCO}_3$ ). Il est issu de la fragmentation de la roche-mère ou de matériaux secondaire.
- Le carbone organique (Corg) est issu de la décomposition d'organismes végétaux (racines, litières, etc.) et animaux (faune du sol) présents dans la matière organique (MO) (Pellerin . S, Bamière . L *et al.*, 2019; Chevallier *et al.*, 2020). On peut alors définir le carbone total (Ctot) :

$$\text{Ctot} = \text{Corg} + \text{Cinorg}$$

*Équation 1 : Le carbone des sols*

- La teneur en carbone fait référence à la proportion massique de carbone organique.
- Le stock de carbone organiques de sols (SCOS) est la mesure du carbone organique des sols (COS) à un instant T pour une superficie donnée en unité de masse. Il se calcule grâce à la teneur en carbone (CCOS) et la densité apparente pondérée (DApond) du sol (Baize, 2018).

$$\text{SCOS} = \text{CCOS} * \text{DApond} * \text{profondeur d'étude}$$

*Équation 2 : Le stock de carbone organique*

- Le stockage est un bilan entre les apports organiques et les sorties par minéralisation pour une étude diachronique et/ou synchronique.
- La séquestration traite du résultat des bilans de stockages pour chaque gaz à effet de serre (GES).

Ces mesures et bilans sont souvent réalisés sur la plage de profondeur 0-30 cm par des organismes tels que le GIEC ou la FAO. (Pellerin . S, Bamière . L *et al.*, 2019; Chevallier *et al.*, 2020).





### 3.3.3. Facteurs influençant le carbone organique des sols

Plusieurs facteurs peuvent influencer la quantité de COS, comme le climat et certaines caractéristiques du sol :

- Une **température** élevée augmente l'activité microbiologique et favorise la dégradation de la MO morte. Cependant, une température trop élevée ou trop basse réduit cette activité (Farage *et al.*, 2003; Pellerin . S, Bamière . L *et al.*, 2019; Cambou *et al.*, 2020).
- La **pluviométrie** favorise la croissance végétale qui augmente la production de litière et donc de COS. Celle-ci joue également sur la teneur en eau du sol qui favorise l'activité biologique. Néanmoins, une trop grande humidité des sols diminue la disponibilité en oxygène pour la faune du sol (Farage *et al.*, 2003; Pellerin . S, Bamière . L *et al.*, 2019; Cambou *et al.*, 2020).
- La **texture du sol**, notamment la fraction argileuse, favorisent la stabilité du COS : une augmentation de la teneur en argile augmente la concentration en COS. En revanche, un sol trop argileux diminue la disponibilité en dioxygène et en eau (Farage *et al.*, 2003; Pellerin . S, Bamière . L *et al.*, 2019; Cambou *et al.*, 2020).
- Le **pH** a une importance significative sur le COS. En effet, entre 4.5 et 8.3, l'activité microbienne est favorisée. De plus, un pH acide ou basique favorise les liens au complexe organo-minérale (Farage *et al.*, 2003; Pellerin . S, Bamière . L *et al.*, 2019; Cambou *et al.*, 2020).
- Enfin, les **nutriments disponibles** du sol exercent aussi une influence : l'azote et le carbone sont liés par le rapport C/N qui permet de connaître la capacité de décomposition de la MO. Un rapport élevé révèle une accumulation du COS dû à une diminution de la capacité de décomposition (Farage *et al.*, 2003; Pellerin . S, Bamière . L *et al.*, 2019; Cambou *et al.*, 2020).
- La **végétation** qui produit une grande partie de la MO influence le stock de COS. La composition biochimique et la vitesse de croissance des espèces impactent la quantité ainsi que le temps de décomposition de la MO morte et donc la teneur en COS (Jobbágy & Jackson, 2000; Quideau *et al.*, 2001).

## Problématique et objectifs

Afin de respecter la loi kazakhe, Katco doit planter des arbres, notamment des *Haloxylon sp.* pour compenser son activité. Orano, de son côté, souhaite également travailler sur le stock de carbone à travers la compensation écologique.

D'après Jobbágy & Jackson, 2000 et Quideau et al., 2001, la végétation participe en grande partie au SCOS par la dégradation de la litière produite et des racines mortes. Cependant, le COS des plantations d'*Haloxylon sp.* dans des zones sableuse au Kazakhstan fluctue dans le temps (Ma *et al.*, 2021).

D'après ces différents constats, nous souhaitons évaluer l'influence de la végétation sur le stock de carbone organique des sols de la zone d'étude afin de l'améliorer dans le cadre de la compensation. Cette problématique peut se décliner en sous questions :

- Quelles strates de végétation influencent significativement le stock de COS ?
- Existe-t-il des différences significatives de SCOS entre les unités paysagères de la zone d'étude ?
- Quelles variables/composantes des sols (exemple : pH) et de la végétation (exemple : densité des ligneux par hectare, etc.) des unités paysagères influencent le SCOS ?

## Matériel et méthodes

### 5.1. Choix des indicateurs

#### 5.1.1. Sol

Afin de répondre à la problématique, le stock de carbone organique dans le sol est mesuré à partir de la teneur en COS (g/kg) et la densité apparente du sol (g/cm<sup>3</sup>) sur la profondeur de référence 0-30 cm.

D'autres indicateurs du sol comme le pH sont pris en compte. La granulométrie sera mesurée mais non prise en compte dans le présent rapport pour des raisons de décalage de certaines analyses.

#### 5.1.2. Végétation

Puisque nous souhaitons évaluer l'influence de la végétation sur le SCOS, des mesures sur la végétation sont réalisées conjointement, dont : la densité de ligneux supérieurs et inférieurs à 50 cm (nombre d'individus/ha), la nécro-masse/masse de litière sous et hors ligneux supérieur à 50 cm (g), la masse racinaire par volume de sol (g/100 cm<sup>3</sup>), la diversité spécifique moyenne d'herbacée ainsi que la biomasse herbacée sous et hors ligneux supérieur à 50 cm (g).

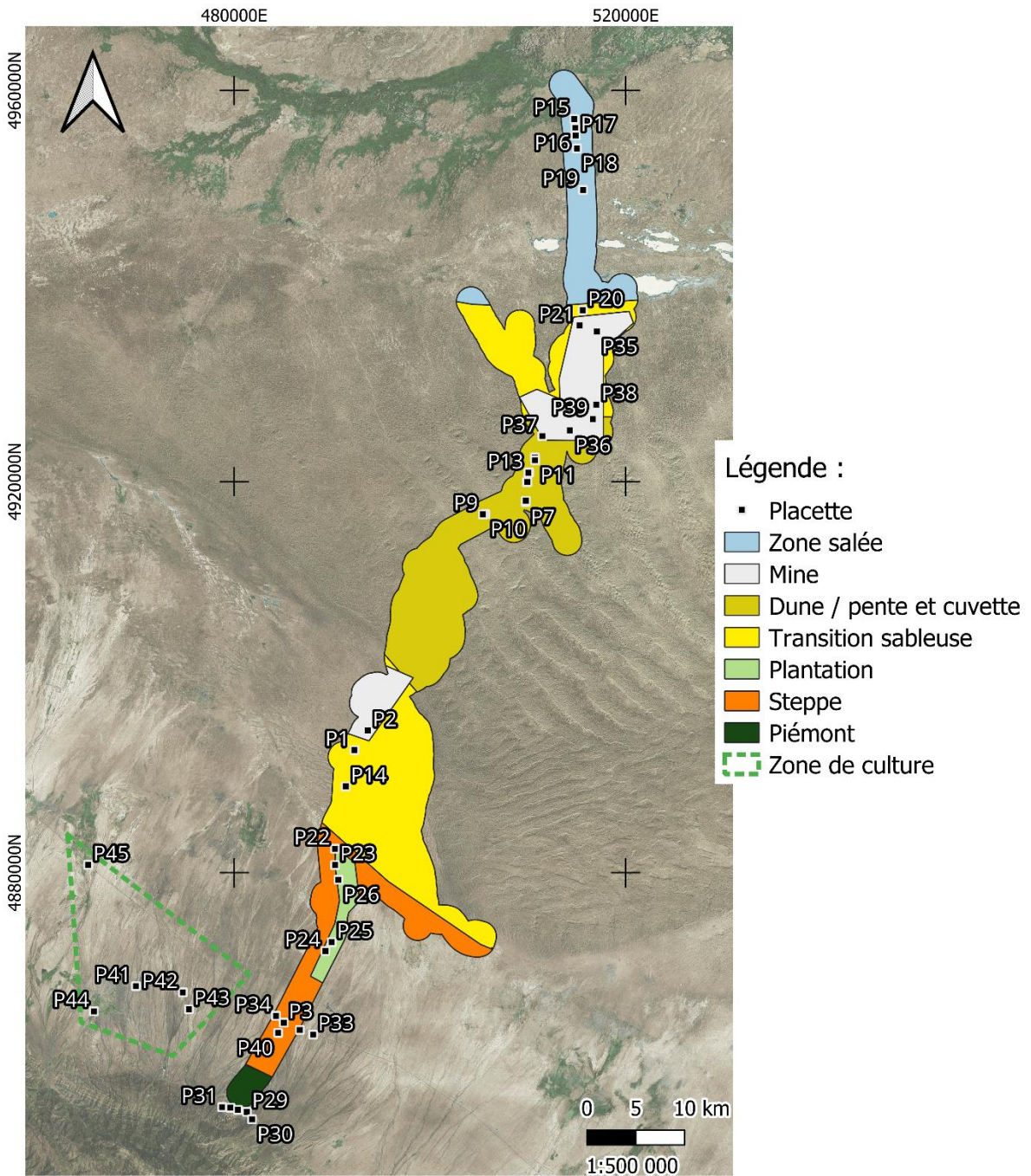
### 5.2. Stratégie d'échantillonnage

Cinq sites de prélèvements (placettes) ont été définis par unité paysagère afin d'avoir des reliquats (Figure 17).

Sur les neuf unités paysagères de la zone d'étude, quatre d'entre elles présentent une strate ligneuse de plus de 50 cm (zone salée, dune & pente, transition sableuse et plantation). Dans ces unités paysagères, les 5 placettes sélectionnées présentent une variation de densité afin d'étudier l'effet de la densité de ligneux supérieur sur le SCOS. Le choix de ces placettes a été réalisé durant la première semaine de terrain par des observations et comptages dû à la difficulté d'obtenir des informations sur la densité en amont par des images sentinel 2. Pour les autres unités paysagères qui ne comportent pas de ligneux supérieurs à 50 cm, les 5 placettes sont définies aléatoirement afin de représenter au mieux l'unité.

Les placettes sont définies par un carré de 25 m de côté et sont espacées entre elles de minimum 800 m, et sont situées à 100 m de la route afin d'éviter les pseudo-répliques et de diminuer l'effet de la route.

Les prélèvements de sol ont lieu sous trois strates de végétation : les ligneux supérieurs à 50 cm (arbres et grands arbustes), les ligneux inférieurs à 50 cm (petits arbustes en majorité, mais également quelques herbacées pérennes présentes dans notre zone d'étude, bien qu'elles ne soient pas lignifiées) et la strate « sol nu » qui regroupe les herbacées annuelles présentes une partie de l'année et les sols nus.



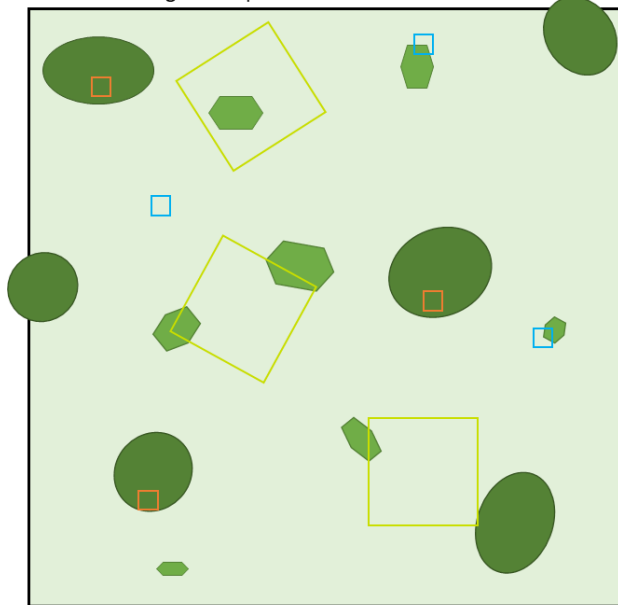
Source : Terrain Kazakhstan 2022  
 Fond de carte : Bing aerial  
 SCR : WGS 84 / UTM 42N EPSG: 32642  
 Date : 19/09/2022  
 Auteur : BEUGNON Aymeric








Figure 17 : Carte représentant la répartition des placettes de prélèvement dans la zone d'étude

## 5.3. Mesures et prélèvement dans les placettes

### 5.3.1. Placette type

Présence de ligneux supérieur à 50 cm



-  Placette
-  Ligneux supérieur à 50 cm
-  Ligneux inférieur à 50 cm
-  Herbacé annuelle / Sol nue
-  Quadra sous arbre 1m\*1m prélèvement sol et biomasse herbacé
-  Quadra hors arbre 1m\*1m prélèvement sol et biomasse herbacé
-  Quadra mesure ligneux inférieur à 50cm 3m\*3m

Absence de ligneux supérieur à 50 cm

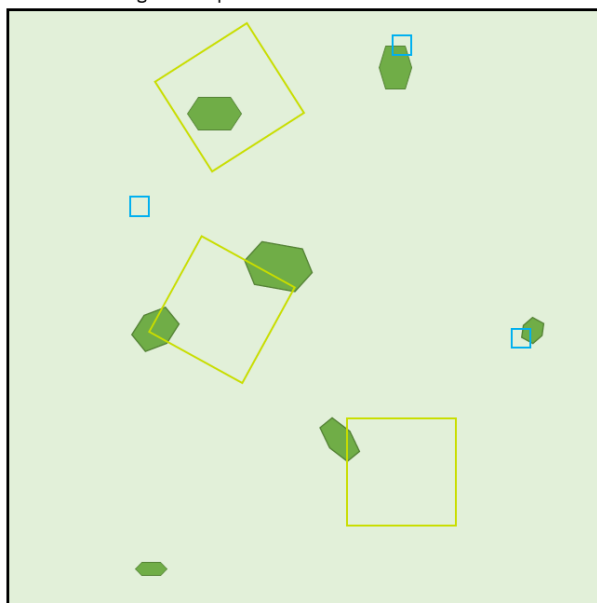


Figure 18 : Schémas de la prise de mesure au sein d'une placette type : cas avec et sans ligneux supérieur à 50 cm

Ayant des unités paysagères avec ligneux supérieurs à 50 cm et d'autres sans, deux cas de figure sont présents (Figure 18). Dans le cas de présence de ligneux supérieurs à 50 cm, il y a 6 quadrats de 1m<sup>2</sup> disposés aléatoirement dont 3 sous ligneux supérieurs à 50 cm et 3 en dehors. Sur les placettes sans ligneux supérieur à 50 cm, seulement 3 quadrats disposés aléatoirement sont présents. Dans les deux options, il y a 3 quadrats de 9m<sup>2</sup> aussi disposés aléatoirement.



### 5.3.2. Mesures et prélèvements de la végétation

Dans les quadrats de 1m<sup>2</sup>, le comptage du nombre d'espèces présentes (herbacées et petites ligneuses), le prélèvement de la litière puis des herbacées avec la tondeuse BOSCH Isio 3 permettent d'obtenir la diversité spécifique moyenne par placette sous et hors ligneux supérieur à 50 cm, ainsi que le poids de la nécromasse (litière) et de la biomasse fraîche (g) (Scout Pro OHAUS 400g) (Annexe 3).

Dans les quadrats de 9m<sup>2</sup>, les ligneux inférieurs à 50 cm sont comptés par espèce, suivi de l'estimation des deux diamètres de la touffe sur 10 individus maximum par espèces.

A l'échelle de la placette, un comptage des ligneux supérieur à 50 cm par espèce est aussi réalisé avec la mesure de deux diamètres du houppier (m) sur 10 individus maximum par espèces. Ceci permet d'estimer la densité de végétation ainsi que la surface d'influence des strates « supérieur à 50 cm » et « inférieur à 50 cm ».

### 5.3.3. Prélèvements du sol

Pour obtenir la teneur en carbone organique et totale ainsi que le pH eau, les prélèvements de sols ont lieu dans les quadrats de 1m<sup>2</sup>. Pour la strate de grand ligneux supérieur à 50 cm, un prélèvement de sol dans chaque quadrat au pied du tronc est réalisé. Dans les trois autres carrés, deux prélèvements par quadrat ont lieu. Un pour la strate de ligneux inférieurs à 50 cm et un autre pour le sol nu.

Ainsi, il y a trois prélèvements par strate. Pour chacune d'entre elles, un mélange des trois prélèvements puis une séparation par cartage est réalisée afin d'obtenir un échantillon représentatif de chaque strate de la placette.

Ensuite, sur un des quadrats arbre et sur deux des quadrats hors arbres, des prélèvements de racines sur 0-10 cm et de densité apparente sur 1-10, 11-20 et 21-30 cm sont effectués (Annexe 3).

Les prélèvements de sol sont réalisés avec une tarière Edelman pour la plupart des sites et une tarière à oreillette pour les sols sableux. Pour les racines et la densité apparente, des cylindres de densité d'un volume de 100 cm<sup>3</sup> sont utilisés.

## 5.4. Analyses des échantillons et des données

Plusieurs traitements et analyses des échantillons sont réalisés pendant et après la phase de terrain.

### 5.4.1. Pendant le séjour au Kazakhstan

#### 5.4.1.1. Végétation

Les prélèvements de biomasse sont séchés à l'air sur place pour avoir la masse sèche (g). Une fois secs, ils sont pesés (Scout Pro OHAUS 400g), puis découpés et mis en enveloppe pour des analyses fourragères ultérieures (à Montpellier) par Spectrométrie Proche Infra-Rouge SPIR qui serviront à l'étude de services d'approvisionnement dans le projet (Annexe 3).

La nécro-masse est séchée au four à 50 °C pendant 24H puis pesée à son tour (g).

#### 5.4.1.2. Sol

Les prélèvements de sols sont séchés à l'air libre ou au four à 40°C pour les plus humides avant d'être tamisés à 2mm et emballés en double sac étanche pour être envoyés au laboratoire US analyse CIRAD<sup>1</sup> (Annexe 3).

Quant à la densité apparente, les échantillons ont été pesés puis séchés au four à 60°C pendant 48h au Kazakhstan avant d'être tamisé à 2 mm pour avoir la masse d'éléments grossiers (g) et la densité apparente pondérée (g/cm<sup>3</sup>).

Une fois prélevés, les mélanges sols / racines sont tamisées à 2mm afin de récupérer les racines. Elles sont ensuite emballées pour être ramenées à Montpellier.

#### 5.4.2. A Montpellier

##### 5.4.2.1. Végétation

Les racines sont lavées avant d'être pesés (balance Mettler Toledo AB204-S). Ensuite, elles sont séchées à l'étuve pendant 48H à 50°C avant d'être à nouveau pesé pour obtenir la masse sèche (g).

##### 5.4.2.2. Sol

Le laboratoire a réalisé plusieurs analyses concernant des services étudiés dans le cadre du projet de thèse de Mme BARNES. Parmi ces analyses, il y a la teneur en carbone totale des échantillons par la méthode de combustion sèche Dumas (NF ISO 10694) et la teneur en carbone inorganique (carbonates CaCO<sub>3</sub>) par calcimétrie (NF ISO 10693). La teneur en carbone organique est déduite grâce à la formule citée plus haut : C<sub>org</sub> = C<sub>tot</sub> - C<sub>inorg</sub> (Équation 1). En plus des mesures sur le carbone des sols, le pH eau est analysé par le laboratoire US analyse CIRAD (Annexe 3).

#### 5.4.3. Calcul des variables / indicateurs

A partir des mesures effectuées sur le terrain, les densités (nombre d'individus/ha) de ligneux supérieurs et inférieurs à 50 cm de chaque site sont calculés. Pour cela, on divise le nombre d'arbre de la placette par 0,0625 (625/10000).

L'aire d'influence (m<sup>2</sup>) de chaque strate est aussi déterminée. On considère que la surface d'influence d'un ligneux correspond à sa couronne qui a une forme ellipsoïdale. Pour chaque placette nous calculons la moyenne des deux diamètres (D1 et D2 en m) mesurés par espèce. Puis on calcule la surface moyenne par espèce :

$$AE_n (m^2) = \pi * (D1 / 2) * (D2 / 2)$$

*Équation 3 : Aire d'une ellipse*

Puis, on multiplie chaque surface moyenne par le nombre d'individus de l'espèce (nb individu sp<sub>i</sub>) et on additionne le tout par strate afin d'obtenir l'aire d'influence de la strate<sub>n</sub>.

$$AIS_n (m^2) = AE_1 * nb \text{ individus } sp_1 + AE_2 * nb \text{ individus } sp_2 \dots + AE_n * nb \text{ individus } sp_n$$

*Équation 4 : Aire d'influence d'une strate*

---

<sup>1</sup> <https://us-analyses.cirad.fr/>

On obtient ainsi une aire (m<sup>2</sup>) pour les deux strates ligneuses.

$$\text{Placette (625m}^2\text{)} = \text{surface lign}+50 + \text{surface lign}-50 + \text{surface sol nu}$$

*Équation 5 : Composition d'une placette*

Pour la strate sol nu, on soustrait les deux aires des ligneux à l'aire de la placette.

$$\text{Surface sol nu (m}^2\text{)} = 625 - \text{surf lign}+50 - \text{surf lign}-50$$

*Équation 6 : Surface d'influence de la strate sol nu*

Le stock de carbone organique, comme cité plus haut est calculé par la formule suivante pour chacune des trois strates de végétation (Équation 2) :

$$\text{SCOS (kg/m}^2\text{)} = \text{CCOS (g/kg)} * \text{DApond (g/cm}^3\text{)} * \text{profondeur d'étude (0,3 m)}$$

Une valeur de stock de carbone par placette (donc, pour 625 m<sup>2</sup>) est calculée grâce aux aires d'influences de chaque strate par la formule suivante :

$$\text{SCOS P}_n \text{ (kg)} = \text{SCOS sous ligneux} > 50 \text{ cm} * \text{aire influence ligneux} > 50 \text{ cm} + \text{SCOS sous ligneux} < 50 \text{ cm} * \text{aire influence ligneux} < 50 \text{ cm} + \text{SCOS sur sol nu} * \text{aire influence sol nu.}$$

*Équation 7 : Stock de carbone organique pour une placette*

Les variables masse sèche de biomasse (g), nécro-masse (g), racine (g/100 cm<sup>3</sup>) ainsi que le nombre moyen d'espèces herbacées par placette sont aussi utilisés pour les analyses de données.

#### 5.4.4. Analyses statistiques des données

Différents tests et représentation graphiques sont réalisés à l'aide du logiciel d'analyses statistiques Rstudio pour répondre aux différents objectifs (Annexe 4).

Pour visualiser l'effet des strates de végétation et des unités paysagères, un boxplot représentant le SCOS en fonction de ces deux variables qualitatives est réalisé. Ensuite, des boxplots du SCOS en fonction des deux variables combinées est effectué.

Par la suite, des tests de Kruskal-Wallis et Wilcoxon (Millot, 2018) permettent de vérifier l'influence des deux variables sur le stock de COS vue graphiquement.

Pour comprendre les variations de stocks entre unités paysagères, les composantes de celles-ci sont alors prises en compte. C'est ici que les composantes de sol et de végétation : pH, masse racinaire, biomasse, nécromasse, densités de ligneux ainsi que le nombre moyen d'espèces d'herbacées et de petites ligneuses sont utilisés. Une ACP (Husson, 2018) est réalisé sur ces composantes, avec le SCOS et les unités paysagères en variables supplémentaires.

A la suite de l'ACP, un lien entre certains indicateurs et le stock de COS pourra être mis en évidence. Une exploration indicateur par indicateur avec test de Kendall est réalisé pour étudier la significativité de la corrélation indicateur - SCOS par rapport aux résultats de l'ACP.

Enfin, en dernier résultat, un biplot issu de l'ACP permet de mettre en évidence la dépendance des unités paysagères avec les composantes. Ce graphique permettra une meilleure visualisation des données des boxplots précédents.

## Résultats

### 6.1. Description des résultats bruts

Le Tableau 1 représente les valeurs moyennes des 99 échantillons analysés pour les variables teneurs de carbone total des sols et de carbone organique (g/kg), pH eau et densité apparente (g/cm<sup>3</sup>). Le carbone organique de la zone d'étude représente en moyenne 10% du carbone total contenue dans le sol. Le carbone total du sol provient donc essentiellement des matériaux géologiques du sous-sol. Le pH eau de la zone d'étude est très basique. En agronomie, le pH optimal est compris entre 6.5 et 7.5. Les densités apparente pondéré des sols de la zone d'étude sont plus disparates. Ceci est dû à la grande variabilité granulométrique des sols ainsi qu'aux impacts de l'homme en milieu anthropisé (unités mine et plantation).

Tableau 1 : Valeurs moyenne des échantillons analysés

	Carbone total (g/Kg)	Carbone organique (g/Kg)	pH eau	Densité apparente pondéré (g/cm <sup>3</sup> )
Moyenne	50.85	5.55	9.24	1.34
Ecart type	32.72	5.00	0.37	0.19
Min	5.2	0.1	8.42	0,86
Max	148.3	33	10.35	1,61

### 6.2. Impact des strates de végétation et des unités paysagères

Le but de cette partie est de comprendre si les strates de végétation et/ou les unités paysagères jouent un rôle vis-à-vis du stock de carbone organique dans le sol.

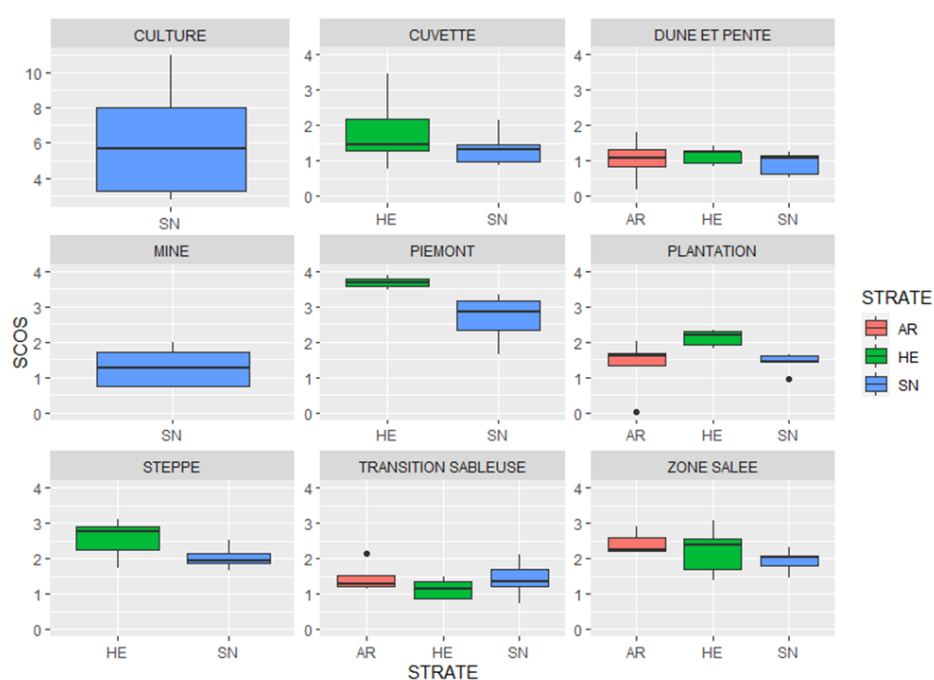


Figure 19 : Graphique en boîte à moustache représentant le stock de carbone organique en fonction de la strate dans chaque unité paysagère  
SCOS en KgC/m<sup>2</sup> ; AR = ligneux supérieur à 50 cm, HE = ligneux inférieur à 50 cm, SN = sol nu

La Figure 19 représente des diagrammes en boîte à moustache des différentes strates de chaque unité paysagère par rapport au stock de COS. Le SCOS varie entre les strates de chaque unité paysagère. Le stock le plus conséquent de la zone d'étude est dans l'unité culture, tandis que le plus faible est au niveau mine. Toutes deux sont des unités paysagères modifiées par l'Homme.

### 6.2.1. Strates

La Figure 20 montre de légères différences entre les strates de végétation en termes de stock de COS, et la strate ligneuse inférieur à 50 cm (HE) est supérieure aux deux autres de ce point de vue .

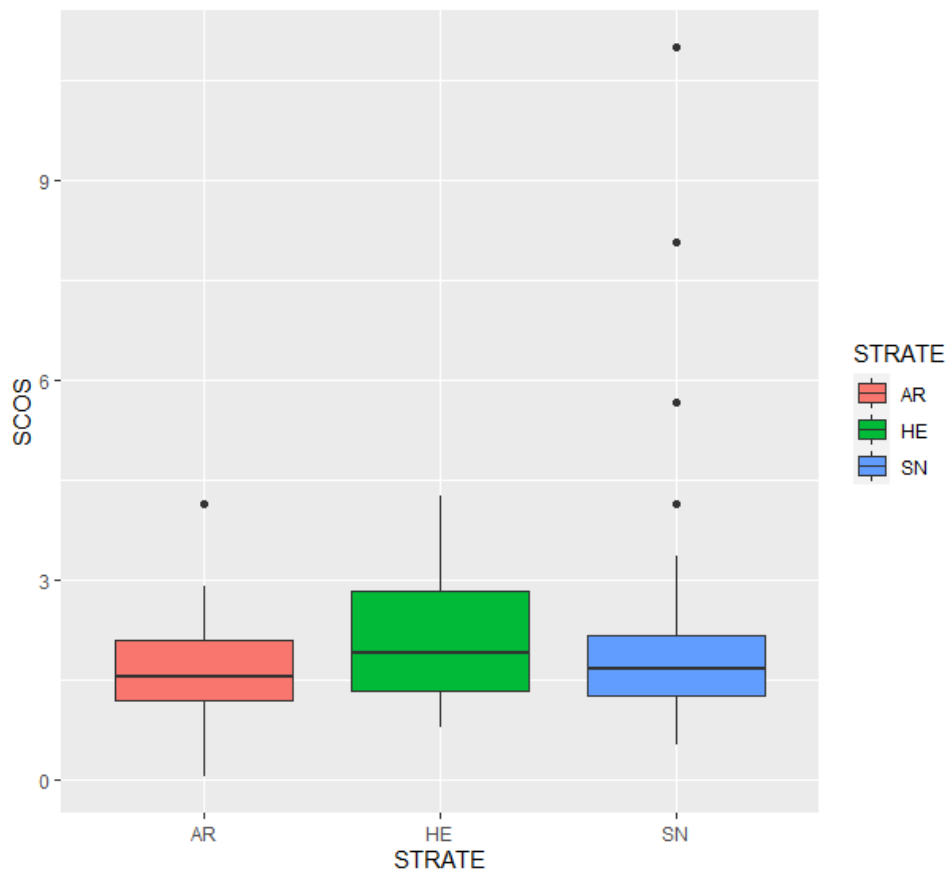


Figure 20 : Graphique en boîte à moustache représentant le stock de carbone organique en fonction de la strate SCOS en  $\text{KgC/m}^2$  ; AR = ligneux supérieur à 50 cm, HE = ligneux inférieur à 50 cm, SN = sol nu

Afin de vérifier l'existence de différences significatives entre les strates sur le stock de carbone organique dans le sol, des tests de Kruskal Wallis ont été réalisés pour les deux variables qualitatives : unités paysagères et strates de végétation. Les données ne suivent pas une loi normale, le test de Kruskal Wallis est préféré à une ANOVA. Le Tableau 2 met en évidence qu'il n'y a pas de différence significative entre strates vis-à-vis du stock de COS (ligne « STRATE », en gras). Cependant, nous pouvons voir dans ce même tableau le détail de l'influence des strates par unité paysagère : la différence est alors un peu plus contrastée, notamment pour les plantations avec une significativité de 95% (indiquée avec un « . »).



Tableau 2 : Tableau des p-value pour les différences entre strates issu du test de Kruskal Wallis (AR = ligneux supérieur à 50 cm, HE = ligneux inférieur à 50 cm, SN = sol nu)

	Taille échantillon	p-value
<b>STRATE</b>	<b>19AR, 35HE, 45SN</b>	<b>0.2398</b>
Zone salée	4AR, 5HE, 5SN	0.1976
Dune et pente	5AR, 5HE, 5SN	0.5273
Cuvette	5HE, 5SN	0.4647
Transition sableuse	5AR, 5HE, 5SN	0.3946
Plantation	5AR, 5HE, 5SN	0.01674 .
Steppe	5HE, 5SN	0.1172
Piémont	5HE, 5SN	0.0758
Culture	5SN	
Mine	5SN	
Codes : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '' 1		

Il y a donc peu de liens significatifs entre le stock de carbone organique dans les sols et les strates végétales, mais ce lien semble exister entre stock de COS et unités paysagères.

### 6.2.2. Unités paysagères

Visualisons maintenant le lien entre SCOS et unités paysagères dans la Figure 21.

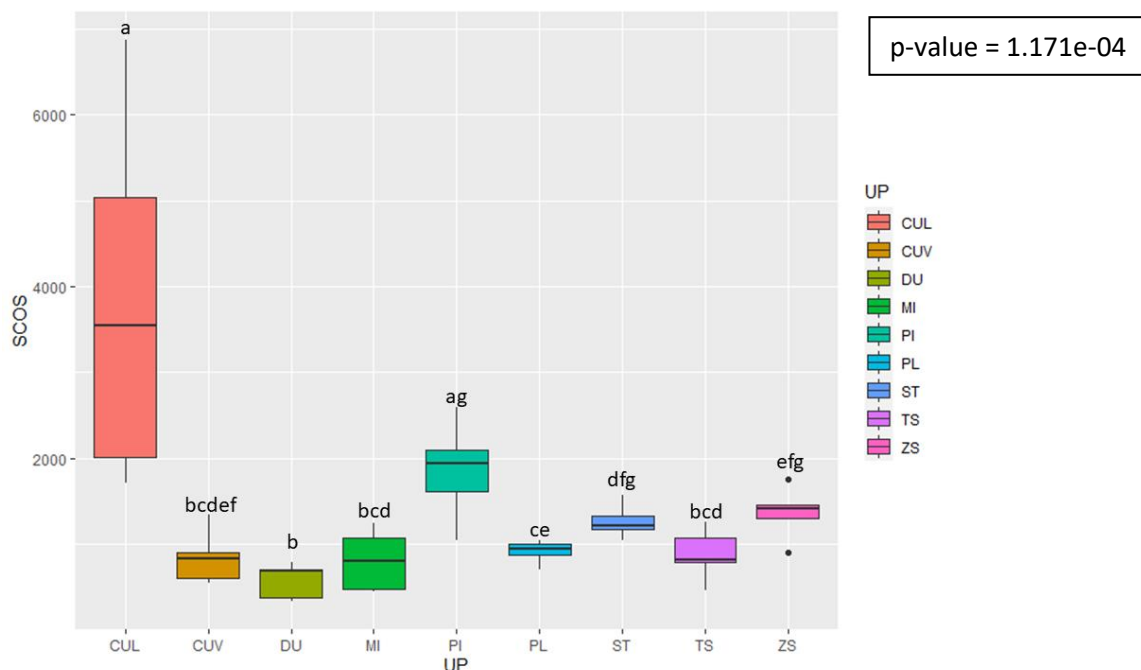


Figure 21 : Graphique en boîte à moustache représentant le stock de carbone organique en fonction de l'unité paysagère SCOS en KgC/ha ; CUL = culture, CUV = cuvette, DU = dune & pente, MI = mine, PI = piémont, PL = plantation, ST = steppe, TS = transition sableuse, ZS = zone salée

Le test ainsi que la représentation graphique (Figure 21) montrent des différences de SCOS entre unités paysagères à une significativité de 99.9% ( $p$ -value < 0,001). Les lettres sur chaque box plot sont issues d'un test de Wilcoxon par paires entre groupes. Elles permettent de voir ces différences entre chaque unité paysagère. Si plusieurs unités paysagères partagent une lettre commune, ils n'ont pas de différence significative. Par exemple, le piémont et les dunes sont différents significativement du point de vue du SCOS.

Ce lien entre le stock de COS et unités paysagères peut être lié aux composantes et caractéristiques de ces unités.

### 6.3. Impact des composantes et caractéristiques des unités paysagères

Afin d'étudier l'influence des composantes et caractéristiques des unités paysagères sur le stock de COS, une ACP est réalisée pour comparer les variables litière/nécromasse, densité de ligneux supérieurs et inférieur à 50 cm, biomasse et nombre moyen d'espèces d'herbacées et de petites ligneuses, masse racinaire et pH eau (Figure 22). Le SCOS est en variable supplémentaire. L'unité paysagère « culture » n'est pas prise en compte dans l'ACO pour des raisons de normalité. Pour réaliser l'ACP, les indicateurs litière, biomasse et SCOS ont dû être pondérés en utilisant l'Équation 7.

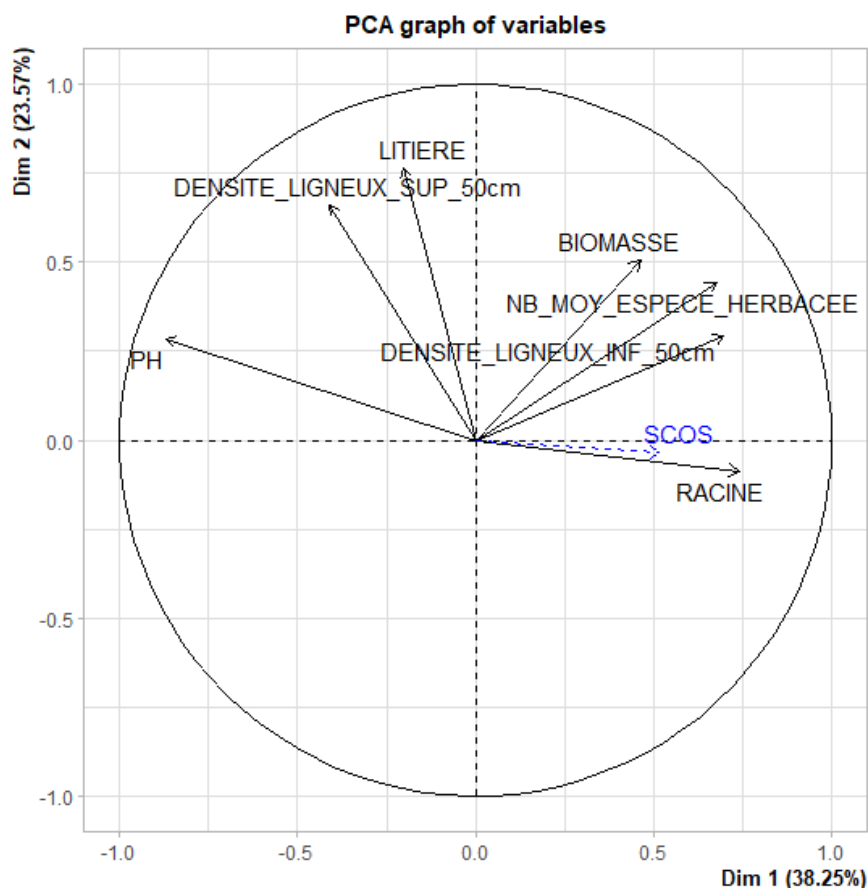


Figure 22 : Cercle de corrélation des variables  
 SCOS en KgC/ha, RACINE en g, DENSITE\_LIGNEUX\_SUP\_50cm = densité de ligneux supérieur à 50 cm en nb/ha, DENSITE\_LIGNEUX\_INF\_50cm = densité de ligneux inférieur à 50 cm en nb/ha, BIOMASSE en g, LITIERE en g, NB\_MOY\_ESPECE\_HERBACEE = nombre moyen d'espèces herbacée dans la placette, PH = pH eau

L'axe 1 est expliqué par la masse racinaire, la densité de ligneux inférieurs à 50 cm, du nombre moyen d'espèces d'herbacées et de petites ligneuses et en partie par la biomasse d'herbacées et de petites ligneuses. L'axe 1 est donc nommée « Hors arbre ». L'axe 2 est lié à la densité de ligneux supérieur à 50 cm, la masse de litière et en partie la biomasse d'herbacées et de petites ligneuses. Ces variables étant en lien avec la dimension arbre (ligneux > 50 cm), l'axe est nommé « sous-arbre ».

Une fois projeté, le SCOS tend positivement vers l'axe 1 et est opposé au pH eau. Ce seraient donc les variables de l'axe « hors-arbre » : biomasse racinaire, nombre moyen et biomasse d'espèces d'herbacées et de petites ligneuses, et densité de ligneux inférieur à 50 cm qui influencent le SCOC.

Cette tendance se voit aussi lorsque l'on projette la densité de ligneux par rapport au stock de COS (Figure 23).

Il y a donc bien une influence positive de la strate ligneux inférieur à 50 cm sur le SCOS (Figure 23), contrairement, au ligneux supérieurs à 50 cm qui n'ont pas de corrélation significative avec le stock de carbone organique dans le sol. La corrélation entre masse de racine et SCOS est visible graphiquement mais la tendance n'est pas significative statistiquement ( $p$ -value > 0,05) (Figure 24, Figure 22). La relation entre pH et SCOS est significativement corrélée négativement (Figure 25).

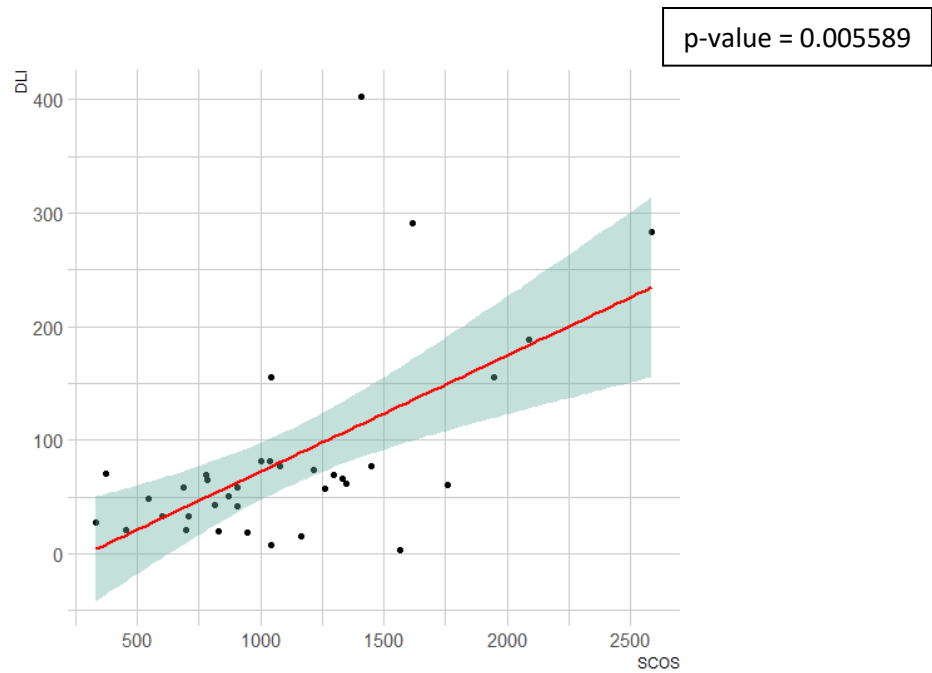


Figure 23 : Nuage de point du stock de carbone organique en fonction de la densité de ligneux inférieur à 50 cm SCOS en KgC/ha, DLI = densité de ligneux inférieur à 50 cm en nb/ha, sans l'unité paysagère culture

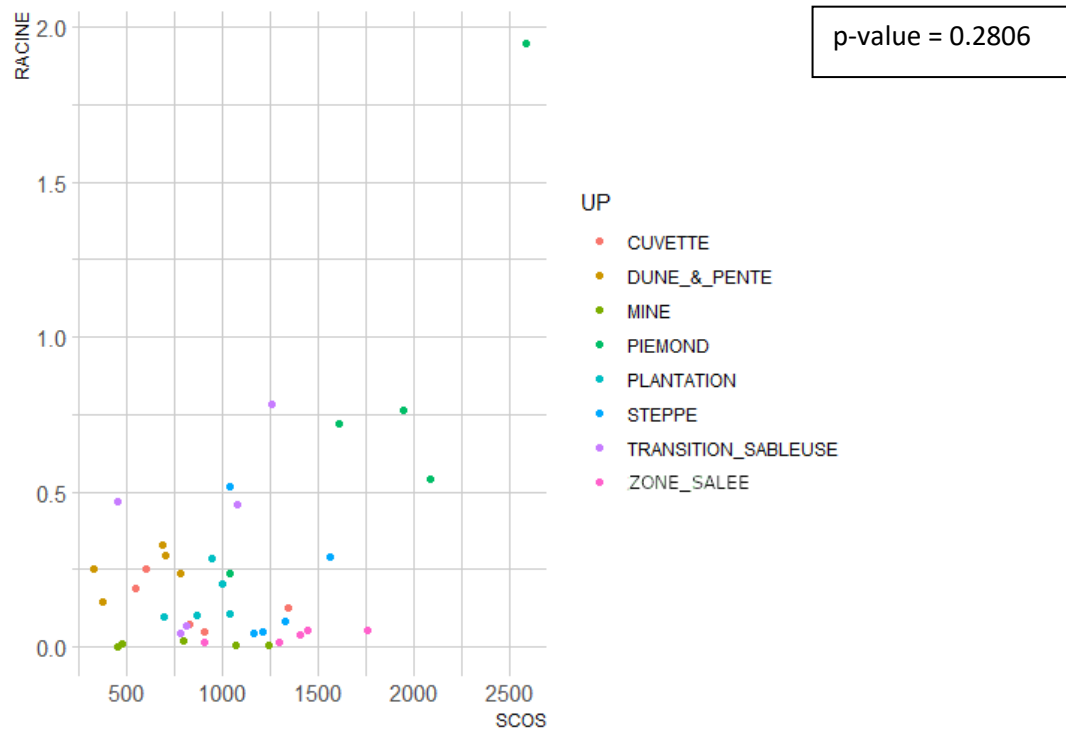


Figure 24 : Nuage de point du stock de carbone organique en fonction de la masse racinaire avec coloration en fonction des unités paysagères SCOS en KgC/ha, RACINE en g, sans l'unité paysagère culture

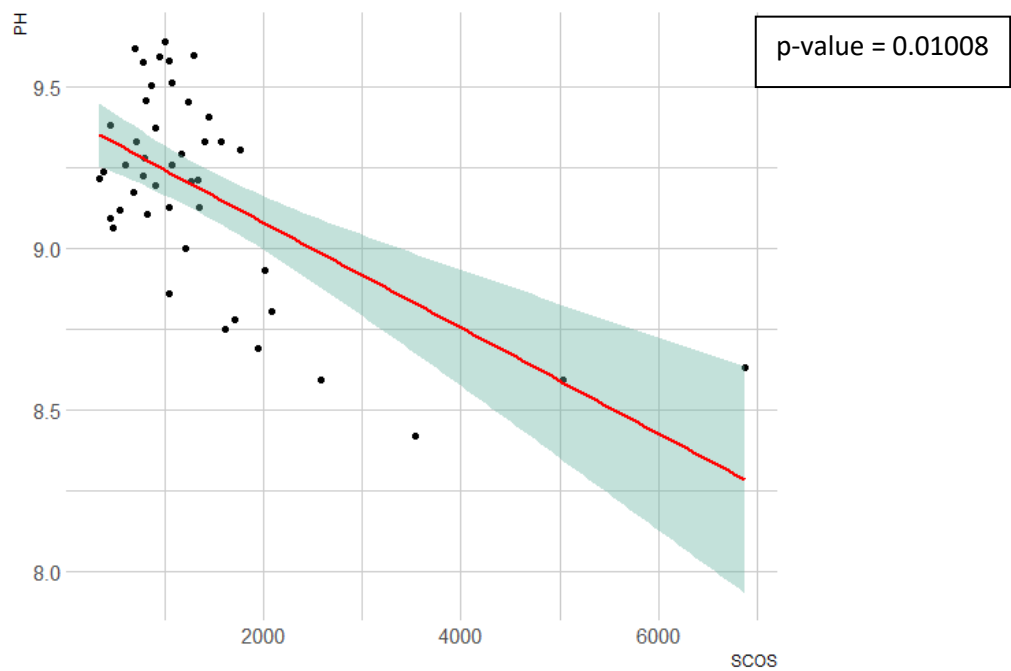


Figure 25 : Nuage de point du stock de carbone organique en fonction du pH SCOS en KgC/ha, PH = pH eau, avec l'unité paysagère culture

La Figure 26 est un biplot issus de l'ACP projetant les « individus », nos placettes, par rapport aux variables, les composantes et caractéristiques des unités paysagères. Les unités contenant des ligneux supérieurs à 50 cm (Zone salée, dune & pente, transition sableuse et plantation) sont essentiellement projeté sur l'axe 2 (« sous-arbre »).

En plus d'une variabilité entre unités paysagères, il y a des variabilités dans ces unités. Cependant, notons que les unités de la zone sableuse (transition sableuse, dune & pente et cuvette) présentent peu de variabilité entre elles.

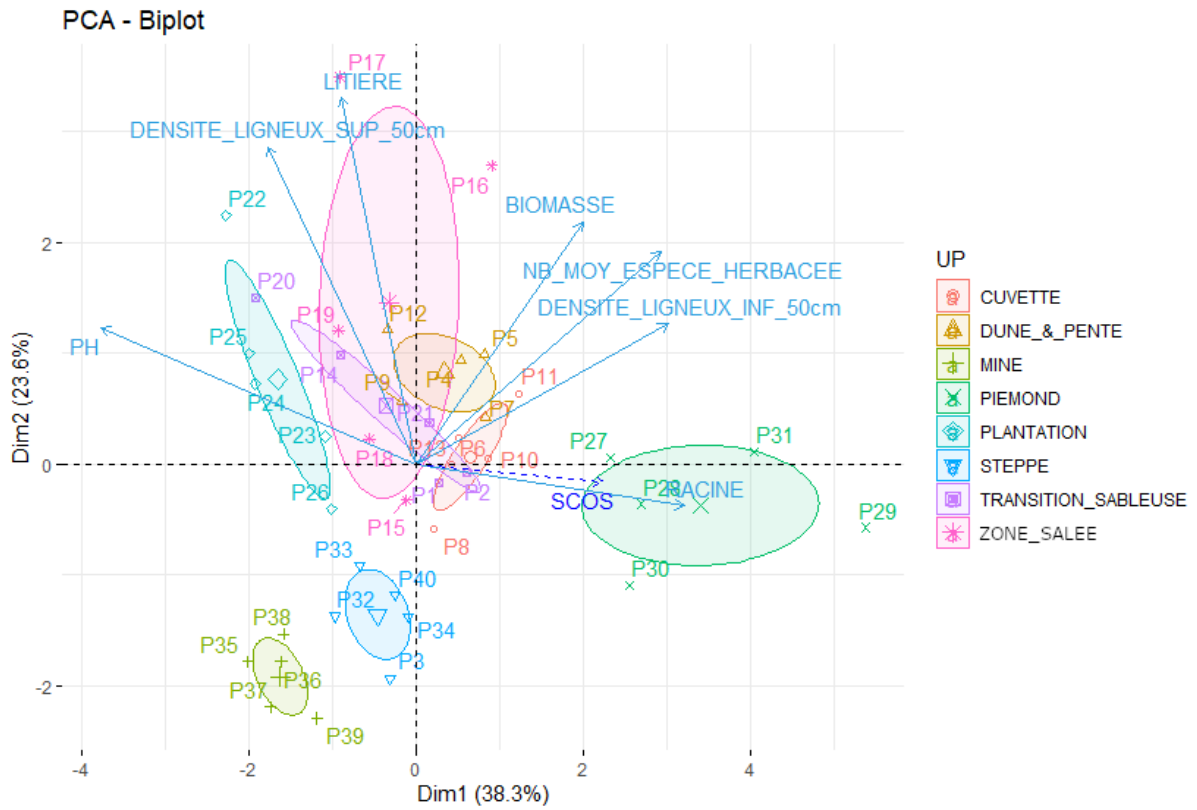


Figure 26 : Cercle de corrélation des variables et des individus  
 SCOS en KgC/ha, RACINE en g, DENSITE\_LIGNEUX\_SUP\_50cm = densité de ligneux supérieur à 50 cm en nb/ha,  
 DENSITE\_LIGNEUX\_INF\_50cm = densité de ligneux inférieur à 50 cm en nb/ha, BIOMASSE en g, LITIERE en g,  
 NB\_MOY\_ESPECE\_HERBACEE = nombre moyen d'espèces herbacée dans la placette, PH = pH eau



## Discussion

### 7.1. Stratégie d'échantillonnage

Le choix des indicateurs et de la stratégie d'échantillonnage a été fait en concertation avec les ingénieurs et chercheurs investis dans le projet de thèse par rapport à un ratio besoin pour le projet, temps sur le terrain et coût du matériel et des analyses des échantillons.

Si l'on se concentre sur l'évaluation du SCOS uniquement, avec nos connaissances actuelles vis-à-vis des données obtenues, et dans l'hypothèse d'un budget illimité, d'une période sur le terrain plus longue et d'une facilitation de la logistique sur place, il pourrait être intéressant d'approfondir les idées présentées ci-dessous.

#### 7.1.1. Redéfinition des unités paysagères d'intérêt

Lors de la phase d'affinage des unités paysagères, la **zone sableuse** a finalement été distinguées en plusieurs unités : **transition sableuse, haut de dune et pente, et cuvette de dune** afin de réduire les variabilités de résultats dans la zone sableuse. Comme le montre nos résultats (Figure 26), il y a finalement peu de différences entre ces unités concernant le SCOS. La transition sableuse, les dunes & pentes et les cuvettes auraient donc pu rester regroupées en une seule unité. Seule la **mine** dans la zone sableuse devrait être distinguée dans la zone sableuse à l'avenir.

Certaines données de COS au sein des unités **cultures** (33 et 31.1 gCOS/Kg pour P41 et P44 contre 5.5 gCOS/Kg en moyenne sur la zone d'étude) et **piémont** (14.1 et 11.6 gCOS/Kg pour P29) sont très différentes du reste de leur propre unité. Ceci est à lier avec nos observations de terrain : dans les cultures, deux placettes (P41 et P44) sont en fait d'anciennes zones cultivées aujourd'hui transformées en prairies permanentes. Ces placettes présentent des caractéristiques proches d'une zone humide qui les distinguent des autres placette culture : leurs sols sont nettement plus humides et foncés, avec une odeur de vase, et présentent une forte densité d'herbacées annuelles et racinaire donnant un aspect spongieux (Figure 27). L'une des placettes du piémont (P29) située près d'un cours d'eau présente les même caractéristiques (Figure 28).





*Figure 27 : Coupe d'une prairie permanente (P41)*



*Figure 28 : Prélèvement de sols sur P29*



Ces placettes présentent finalement un stock de carbone organique dans le sol nettement supérieur aux placettes du reste de la zone d'étude. Il serait donc intéressant de les distinguer dans une unité paysagère à part afin de les étudier particulièrement. En effet, ces zone présente un fort potentiel au regard de quelques valeurs de référence (Robert & Saugier, 2003) : pour les prairies tempérés le stock de carbone est de 100 tC/ha en comptant le réservoir végétation (Figure 29) par exemple.

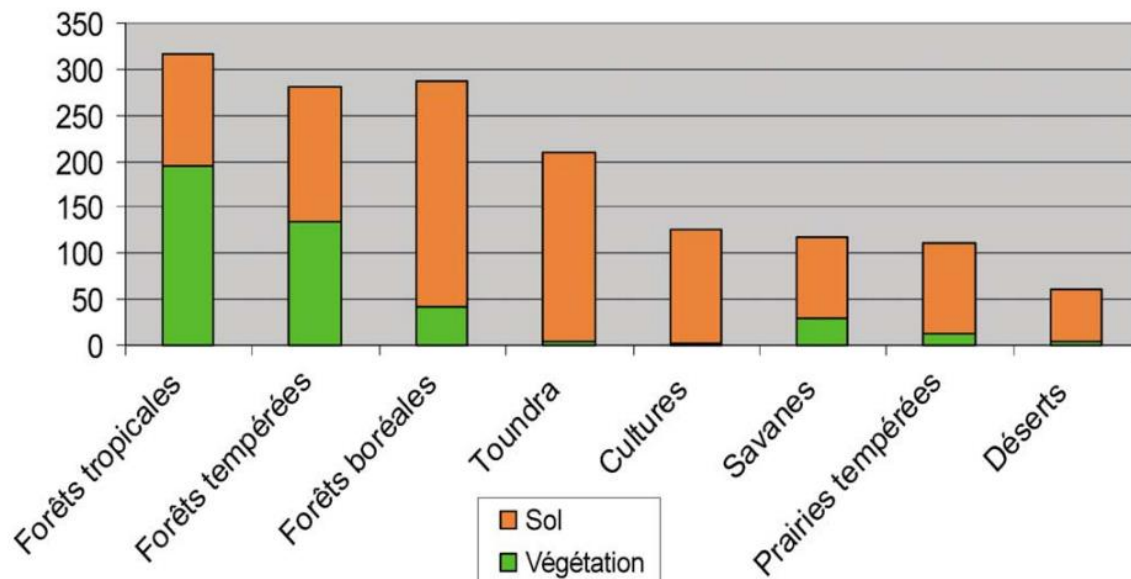


Figure 29 : Stock de carbone en tC/ha dans différents biomes (Robert & Saugier, 2003)

Au niveau de l'étude de l'unité paysagère plantation, un seul type de plantation est présent sur la zone d'étude. Etudier des plantations différentes en termes d'écosystème, de méthode de plantation, ou encore d'espèces aurait pu être un plus pour l'étude afin de mieux comprendre les facteurs d'une « bonne » compensation par plantation et vérifier de manière plus fiable l'intérêt d'une telle pratique pour le stock de COS par exemple.

Afin de travailler de manière plus approfondie, un échantillonnage sous forme de maillage avec des relevés tous les 1 km par exemple permettrait une spatialisation plus précise et augmenterait le nombre d'échantillons et ainsi la fiabilité de l'étude (Munoz-Pardo, Boulier & Vauclin, 1989).

### 7.1.2. Les strates de végétation

Vis-à-vis des résultats obtenus (Figure 19) et afin d'alléger les protocoles, il serait possible d'étudier seulement deux strates sans perte d'information. La première resterait ligneux supérieurs à 50 cm et la seconde regrouperait ligneux inférieur à 50 cm et sol nu. En effet, pour les prélèvements de sols, 3 strates ont été définie (ligneux supérieurs à 50cm, ligneux inférieur à 50 cm et sol nu), alors que pour la végétation, notamment les quadrats de 1m<sup>2</sup> pour la biomasse, seulement deux classes étaient distinguables (sous arbre, hors arbre).

## 7.2. Indicateurs

La masse racinaire a été mesurée sur 0-10 cm. La profondeur de prélèvement résulte d'un choix entre plusieurs protocoles et d'observations de terrain. En effet en parallèle des prélèvements pour la mission, d'autres prélèvements ont été faits pour une autre étude. De plus,

le traitement des racines devait être fait sur une courte période. Enfin, la profondeur moyenne observée des racines est aux alentours des 10 cm pour les herbacées. Cela justifie le choix de prélever les racines sur 0-10 cm.

Etant donné que le système racinaire des ligneux supérieur à 50 cm est plus profond (Gintzburger *et al.*, 2003), il serait pertinent de faire des relevés de sol plus profonds en distinguant les horizons (Boulmane *et al.*, 2010).



Figure 30 : Image mettant en évidence la profondeur d'une Armoise

#### 7.2.1. Des indicateurs pertinents non intégrés à l'étude

Bien que d'autres indicateurs de services écosystémiques aient été mesurés lors du terrain, cette étude se concentre sur le SCOS. Néanmoins, certains de ces indicateurs sont en fait aussi liés au cycle du carbone et à la stabilité du carbone dans les sols. Ils n'ont tout de même pas été présentés dans ce rapport pour différentes raisons.

L'activité biologique, qui rentre en compte dans le cycle du carbone organique, devait être estimée partiellement grâce aux lamina baits, qui mesurent l'activité de la mésofaune (Kratz, 1998). Cependant, par manque de bibliographie sur l'utilisation des lamina baits en milieu semi-aride et par le peu de placettes dans lesquelles elles ont en effet été placées, cette mesure est restée au stade exploratoire. De plus la courte période de terrain (1 mois) n'a pas permis de les laisser en place assez longtemps pour observer effectivement une activité de la mésofaune. Pour l'activité microbiologique, des prélèvements pour des analyses MicroResp™ (Campbell *et al.*, 2003; Creamer *et al.*, 2009) ont été effectués mais celles-ci seront faites plus tard pour des raisons de budget.

La granulométrie, et notamment la fraction argileuse, impacte la stabilité du stock de carbone. Par ailleurs, elle peut aussi servir de proxy pour le service de maintien du sol en surface. C'est pourquoi les prélèvements pour la granulométrie ont été réalisés sur 0-10 cm. Nous ne l'avons donc pas intégré à l'étude sur le SCOS qui est faite sur des prélèvements 0-30 cm. Ces données seront néanmoins prises en compte dans le projet de thèse de Mme Barnes.

### 7.2.2. Aller plus loin dans les mesures

Calculer le carbone contenu dans chaque individu d'une placette, ainsi que de réaliser des relevés lidar serait congruent pour déterminer précisément le stock de CO du réservoir végétation (Chave *et al.*, 2017). En effet, les observations de terrain ont mis en évidence que la litière provient essentiellement des arbres et arbustes et s'accumulent sur le sol <sup>2</sup> (320.5 g sur 3m<sup>2</sup> en moyenne). Cependant, cette litière ne présentait pas de trace de décomposition. Calculer les stocks de ce réservoir permettrait une meilleure estimation du carbone stocké. De plus, les relevés lidar permettraient une meilleure évaluation de la surface d'influence de chaque strate et donc une meilleure estimation du SCOS à l'échelle de la placette.

Les résultats obtenus représentent des valeurs à un instant t. L'étude de la stabilité de ces stocks par rock éval afin de déterminer le carbone organique labile et stable pourrait être une plus-value (Adoum, 2016). Afin d'améliorer la compréhension de ces processus, réaliser une étude du stockage ou de la séquestration serait un plus (Chevallier *et al.*, 2020).

## 7.3. Résultats

Nous pouvons constater que le carbone minéral représente 90% du stock de carbone total (Tableau 1). Ce constat correspond à la bibliographie sur le carbone des sols en zone aride et semi-aride (Farage *et al.*, 2003).

Les caractéristiques et composantes des unités paysagères qui interviennent sur le stock de carbone du sol correspondent à la bibliographie présentée dans le contexte (Farage *et al.*, 2003; Pellerin . S, Bamière . L *et al.*, 2019; Cambou *et al.*, 2020, Jobbágy & Jackson, 2000; Quideau *et al.*, 2001), excepté pour les ligneux supérieurs à 50 cm qui, d'après nos résultats, n'influencent pas le SCOS. Ce résultat peut être dû à plusieurs facteurs, décrits ci-après.

D'après nos observations sur le terrain, la litière, majoritairement issus des ligneux supérieurs à 50 cm, n'est que faiblement dégradée. Le carbone contenu dedans prend donc plus de temps pour intégrer le sol, et il n'est donc pas pris en compte à l'instant t.

De plus, les systèmes racinaires de ces ligneux, notamment celui du saxaul, est profond, ce qui lui permet notamment de capter l'eau dans les nappes : il s'agit d'une espèce phréatophyte (Gintzburger *et al.*, 2003). Ceci signifie que les prélèvements de racines effectués sur 0-10 cm prennent moins en compte les racines des ligneux supérieurs à 50 cm, et que cette strate participe sûrement au stock de carbone du sol mais à une profondeur qui n'a pas été étudiée ici (Chevallier *et al.*, 2020).

---

<sup>2</sup> Ecart type = 539,93 g, min = 0 g, max = 2850 g

Le facteur le plus important, observé sur le terrain et appuyé par la bibliographie est la diminution des herbacées sous arbres en quantité et diversité. En effet, sous les arbres (ligneux inférieur à 50 cm) surtout les *Haloxylon sp.*, il y a moins d'herbacées et de petites ligneuses (77g<sup>3</sup> contre 118 g de biomasse sèche en moyenne pour les relevés hors arbres<sup>4</sup>) (Annexe 5) (GuiQing, DanDan & Yan, 2017). Or, les résultats (Figure 22) montrent que les herbacées et les petites ligneuses influencent positivement le SCOS. Cela pourrait expliquer l'influence négative des ligneux supérieurs à 50 cm sur le SCOS. Ceci pourrait aussi expliquer en partie la différence significative entre strate dans les plantations. En effet, les plantations sont monospécifiques et les observations de terrain montraient qu'il y a peu d'herbacées dans cette unité. Le travail du sol pourrait aussi expliquer la quasi-absence d'herbacées. En effet, à partir de 10 cm le sol est induré.

La mine et la steppe sont dans la partie inférieure gauche de la Figure 26 : ceci correspond aux observations de terrain. En effet, ces deux unités paysagères présentent une faible végétation herbacée et pas de ligneux supérieur à 50 cm. Contrairement à ces deux unités, le piémont, dû à sa forte densité et diversité d'herbacées, est projeté positivement sur l'axe 1 (« hors arbre »).

Parmi nos derniers résultats, des variations de SCOS au sein des unités paysagères est mise en évidence (Figure 26). Nous pourrions penser que ceci peut être en partie dû à la stratégie d'échantillonnage qui cible différentes densités de ligneux supérieurs à 50 cm au sein des 5 placettes par unité paysagère (Chevallier *et al.*, 2020).

Or, il y a aussi des variations de SCOS au sein des unités paysagères sans arbres qui pourraient donc résulter de facteurs climatiques, pédologiques ou biologiques non pris en compte dans l'étude : la densité de ligneux supérieurs à 50 cm n'explique donc pas tout.

#### 7.4. Recontextualisation / recommandations

Comme expliqué précédemment, la notion de compensation intervient en « dernier recours » après avoir évité et ou réduit les impacts d'un projet de développement (Bennett & Gallant, 2017). Il serait donc plus pertinent de d'abord réduire au maximum l'impact de l'activité minière, en réalisant des défriches plus faibles de la végétation et un travail du sol moindre par exemple. Cela permettrait de préserver les stocks déjà présents.

Aux vues des résultats, pour agir positivement sur le service régulation du climat global, il est intéressant d'avantager les strates inférieures à 50 cm afin d'influencer le stock de SCOS, plutôt que la strate arborée.

Par exemple, compenser en favorisant le développement de cultures, fourragères dans notre cas, paraît au premier abord être une possibilité intéressante. Cependant, elle présente plusieurs inconvénients. En effet, augmenter les surfaces cultivées peut entraîner des problèmes liés à la ressources hydrique en augmentant la pression sur ses usages.

---

<sup>3</sup> Ecart type = 66 g, min = 7.4 g, max = 277 g.

<sup>4</sup> Ecart type = 85.6 g, min = 0 g, max = 321.4 g.



De plus, certaines pratiques agricoles peuvent déstabiliser le carbone inorganique et libérer du CO<sub>2</sub>. Premièrement, l'irrigation déstabilise le carbone inorganique, qui compose la plus grande partie du stock de carbone des sols de notre zone d'étude. Deuxièmement, par ajout de fertilisant azoté et soufré, ce carbone est soumis à une acidification et est alors transféré dans l'atmosphère sous forme de CO<sub>2</sub> (Farage *et al.*, 2003). En zone aride, l'utilisation d'eau souterraine pour l'irrigation peut aussi entraîner des rejets de CO<sub>2</sub>. En effet, les eaux souterraines en milieu aride peuvent contenir jusqu'à 1% de Ca et de CO<sub>2</sub>. Une fois mise à la surface, le CO<sub>2</sub> contenu se libère dans l'atmosphère (Farage *et al.*, 2003). Favoriser les cultures n'est donc pas une bonne stratégie de compensation sur le long terme vis-à-vis du SCOS.

D'après ces éléments, une stratégie de préservation du stock existant semble donc être une solution alternative pertinente. Une alternative de compensation serait des plantations en double strate ou la plantation de ligneux favorisant le développement naturel d'autres espèces des autres strates.

En termes de compensation des services écosystémiques, il est plus pertinent de ne pas seulement prendre en compte le stock de carbone pour le service régulation climatique mais de mesurer et comprendre les processus et fonctions à l'origine d'un ensemble de services écosystémiques afin d'optimiser et de calibrer au mieux la compensation de l'activité minière dans le district de Sozak.

## Conclusion

L'objectif de la mission était d'étudier l'influence de la végétation sur le SCOS afin d'émettre des recommandations pour améliorer le SCOS dans le cadre de la compensation écologique par plantation.

Les résultats n'ont pas révélé de différences significatives de SCOS entre strates de végétation mais des différences significatives de SCOS entre unités paysagères. Les composantes de ces unités intervenant sur le stock sont les petites ligneuses, les herbacées pérennes et annuelles ainsi que le pH des sols. Les variables des herbacées et petites ligneuses influençant le SCOS sont leur densité, la diversité moyenne spécifique, la masse racinaire et la biomasse.

De par ces résultats et du contexte de l'étude, nous avons émis plusieurs recommandations. Dans un premier temps, nous préconisons la préservation des stocks existant en réduisant les impacts de l'activité minière par des défriches plus faibles de la végétation et un travail du sol moindre. Dans un second temps, afin de suivre la loi kazakh tout en prenant en compte les souhaits d'Orano, la compensation peut prendre la forme d'une plantation en double strate afin de mettre en place une strate d'herbacées et de petites ligneuses, ou des arbres favorisant le développement naturel des herbacées et des petites ligneuses.

Afin d'améliorer le protocole pour les suites du projet, il est pertinent dans un premier temps de ne plus mettre en place de sous unités paysagères dans la zone sableuse et de distinguer une nouvelle unité : « zone humide ». La prise en compte de plusieurs cas de figure de plantation permettrait une meilleure critique de ces mesures compensatoires. Un échantillonnage des sols plus profond, distingué par horizons, sous forme de maillage et distingué en deux strates (sous arbre et hors arbre) affinerait les résultats. De plus, la prise en compte de l'activité biologique des sols, de la stabilité du carbone organique des sols, et du carbone contenu dans le réservoir végétation améliorerait les décisions à prendre pour les mesures de compensation. Enfin, l'étude du stockage ou de la séquestration du carbone des sols compléterait ces résultats.

Le présent rapport ne témoigne que d'un indicateur d'un service écosystémique. Une compensation prenant en compte différents services écosystémiques, comme les services de contrôle de l'érosion ou de régulation de qualité de sols par exemple, ne présenterait pas forcément les mêmes recommandations. Il est donc important de prendre en compte les différents services d'intérêt dans le processus, pour une compensation plus efficace et plus pertinente.

## Bibliographie

- Adoum A.A.** 2016. Matière organique et stockage de carbone dans les sols de polders de Bol nord-est du lac Tchad dans le contexte de changements globaux en milieu semi-aride. AgroParisTech, Theses. [consulté le 27 septembre 2022]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03116811>.
- Baize denis** 2018. Guide des analyses en pédologie. 3e édition revue et augmenté. QUAE, 326 p.
- BARNES Annaël** 2022a. Entretiens avec juriste de Katco. Kazakhstan
- BARNES Annaël** 2022b. Entretien directrice HSE Katco. Kazakhstan
- BATIYEV Ruslan** 2009. URANIUM PROJECT PRE-FEASIBILITY OF TORTKUDUK CENTRAL (KAZAKHSTAN – KATCO)
- Bennett G., Gallant M.** 2017. State of Biodiversity Mitigation 2017. 92 p.
- Boulmane M., Makhloufi M., Bouillet J.-P., Saint-André L., Satrani B., Halim M., Elantry-Tazi S.** 2010. Estimation du stock de carbone organique dans la chênaie verte du Moyen Atlas marocain. *Acta Botanica Gallica*, **157** (3) : 451-467. doi: 10.1080/12538078.2010.10516222.
- Business and Biodiversity Offsets Programme (BBOP)** 2012. Guidance Notes to the Standard on Biodiversity Offsets. Washington, D.C. : 122 p.
- Cambou A., Vidal-Beaudet L., Cannavo P., Schwartz C.** 2020. Stockage du carbone dans les sols urbains, bilan et perspectives. *Smart city - Ville intelligente*, 327. doi: 10.51257/a-v1-ge1072.
- Campbell C.D., Chapman S.J., Cameron C.M., Davidson M.S., Potts J.M.** 2003. A Rapid Microtiter Plate Method To Measure Carbon Dioxide Evolved from Carbon Substrate Amendments so as To Determine the Physiological Profiles of Soil Microbial Communities by Using Whole Soil. *Applied and Environmental Microbiology*, **69** (6) : 3593-3599. doi: 10.1128/AEM.69.6.3593-3599.2003.
- CGDD, CEREMA** 2018. Théma - guide d'aide à la définition des mesures ERc
- Chave J., Baghdadi N., Barbier N., Borderies P., Ciais P., Coueron P.** 2017. Estimation des stocks de carbone dans la biosphère terrestre. 2ème Colloque de restitution du Tosca. p. 29
- Chevallier T., Razafimbelo T.M., Chapuis-Lardy L., Brossard M. (éd )** 2020. Carbone des sols en Afrique: Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles. Rome, Italy : IRD and FAO, 274 p.
- CIRAD** 2022. Le Cirad en bref. CIRAD. [consulté le 16 août 2022]. <https://www.cirad.fr/nous-connaître/le-cirad-en-bref>
- Climat Sozaq: Pluviométrie et Température moyenne Sozaq, diagramme ombrothermique pour Sozaq - Climate-Data.org** 2022. [consulté le 16 août 2022]. <https://fr.climate-data.org/asia/kazakhstan/south-kazakhstan-province/sozaq-755230/>
- Creamer R.E., Bellamy P., Black H.I.J., Cameron C.M., Campbell C.D., Chamberlain P., Harris J., Parekh N., Pawlett M., Poskitt J., Stone D., Ritz K.** 2009. An inter-laboratory comparison of multi-enzyme and multiple substrate-induced respiration assays to assess method consistency in soil monitoring. *Biology and Fertility of Soils*, **45** (6) : 623-633. doi: 10.1007/s00374-009-0374-y.
- Farage P., Pretty J., Ball A.** 2003. Biophysical Aspects of Carbon Sequestration in Drylands25.

- Fisher B., Turner R.K., Morling P.** 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, **68** (3) : 643-653. doi: 10.1016/j.ecolecon.2008.09.014.
- Gintzburger G., Toderich K.N., Mardonov B.K., Mahmudov M.M.** 2003. Rangelands of the arid and semi-arid zones in Uzbekistan. CIRAD,
- GuiQing X., DanDan Y., Yan L.** 2017. Patterns of biomass allocation in *Haloxylon persicum* woodlands and their understory herbaceous layer along a groundwater depth gradient. *Forest Ecology and Management*, **395** : 37-47.
- Husson F.** 2018. R pour la statistique et la science des données. Rennes : PUR, 416 p.
- IUSS Working Group WRB** 2015. World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports ., ( No. No. 106). Rome : FAO
- Jobbágy E.G., Jackson R.B.** 2000. THE VERTICAL DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON AND ITS RELATION TO CLIMATE AND VEGETATION. *Ecological Applications*, **10** (2) : 423-436. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2.
- KATCO** 2020. DELIVERING ON OUR SUSTAINABILITY AGENDA. 34 p.
- Kratz W.** 1998. The bait-lamina test. *Environmental Science and Pollution Research*, **5** (2) : 94-96. doi: 10.1007/BF02986394.
- Larousse É.** 2022a. Définitions : phréatophyte - Dictionnaire de français Larousse [consulté le 30 septembre 2022]. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/phr%C3%A9atophyte/60544>
- Larousse É.** 2022b. Définitions : psammophyte, psammophile - Dictionnaire de français Larousse [consulté le 30 septembre 2022]. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/psammophyte/64731>
- Larousse É.** 2022c. Définitions : xérophyte - Dictionnaire de français Larousse [consulté le 30 septembre 2022]. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/x%C3%A9rophyte/82893>
- Ma Q., Wang X., Chen F., Wei L., Zhang D., Jin H.** 2021. Carbon sequestration of sand-fixing plantation of *Haloxylon ammodendron* in Shiyang River Basin: Storage, rate and potential. *Global Ecology and Conservation*, **28** : 13. doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01607.
- Millot G.** 2018. Comprendre et réaliser les tests statistiques à l'aide de R: Manuel de biostatistique. 4e édition. Louvain-la-Neuve Paris : DE BOECK SUP, 960 p.
- Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères** 2022. Présentation du Kazakhstan. France Diplomatie - Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. [consulté le 16 août 2022]. <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/dossiers-pays/kazakhstan/presentation-du-kazakhstan/>
- Munoz-Pardo J., Boulier J.F., Vauclin M.** 1989. Etude de L'échantillonnage D'un Phenomene Bidimensionnel par Simulation D'une Fonction Aleatoire. In: Armstrong M. (ed). *Geostatistics*. Dordrecht : Springer Netherlands : p. 837-850 (Coll. Quantitative Geology and Geostatistics).
- notre-environnement.gouv.fr** 2022. Éviter, réduire, compenser » (ERC) : en quoi consiste cette démarche ? notre-environnement.gouv.fr. [consulté le 29 septembre 2022]. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/evaluation/article/eviter-reduire-compenser-erc-en-quoi-consiste-cette-demarche>

**ORANO 2021a.** Rapport Annuel d'Activité. 321 p.

**ORANO 2021b.** Les activités minières d'Orano Dossier d'information. 32 p.

**Pellerin . S, Bamière . L, Jérôme Balesdent, Isabelle Basile-Doelsch, Valentin Bellassen, Rémi Cardinael, Lauric Cécillon, Eric Ceschia, Claire Chenu, Julie Constantin, Joël Darroussin, Philippe Delacote, Nathalie Delame, François Gastal, Daniel Gilbert, Anne-Isabelle Graux, Bertrand Guenet, Sabine Houot, Katja, Klumpp, Elodie Letort, Isabelle Litrico, Manuel Martin, Safya Menasseri, Delphine Mézière, Thierry Morvan, Claire Mosnier, Jean Roger-Estrade,, Laurent Saint-André, Jorge Sierra, Olivier Théron, Valérie Viaud, Régis Grateau, Sophie Le Perche, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère** 2019. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA. France : INRA : 114 p.

**Présentation / L'unité - Unité mixte de recherche Système d'élevage méditerranéens et tropicaux (SELMET) 2022.** [consulté le 16 août 2022]. <https://umr-selmet.cirad.fr/l-unite/presentation>

**Quideau S.A., Chadwick O.A., Benesi A., Graham R.C., Anderson M.A.** 2001. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma*, **104** (1-2) : 41-60. doi: 10.1016/S0016-7061(01)00055-6.

**Robert M., Saugier B.** 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, **335** (6-7) : 577-595. doi: 10.1016/S1631-0713(03)00094-4.

**Service Économique d'Astana** 2018. Les ressources énergétiques du Kazakhstan. 4 p.

**UMR AMAP - botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations 2022.** [consulté le 16 août 2022]. <https://amap.cirad.fr/fr/unite.php>

## Table des annexes

Annexe 1 : Table des caractéristiques rocheuse de la zone d'étude (BATIYEV Ruslan, 2009).....	58
Annexe 2 : Photos des unités paysagères (Terrain Kazakhstan 2022, crédit photos Barnes, Zhun, Maeght, Stokes, Bazan, Taugourdeau et Beugnon).....	61
Annexe 3 : Photos d'illustration de la mission Terrain Kazakhstan 2022, crédit photos Barnes, Zhun, Maeght, Stokes, Bazan, Taugourdeau et Beugnon) .....	67
Annexe 4 : Codes R utilisés pour l'analyse statistique .....	68
Annexe 5 : Diagramme comparant la biomasse sous arbre et hors arbre.....	69







*Culture*



*Zone sableuse*



*Zone salée*



*Plantation*





*Steppe*

*Annexe 2 : Photos des unités paysagères (Terrain Kazakhstan 2022, crédit photos Barnes, Zhun, Maeght, Stokes, Bazan, Taugourdeau et Beugnon*



*Tonte de la biomasse herbacée*



*Pesé et mise en sachet de la biomasse herbacée fraîche*





*Quadrat de 1m<sup>2</sup> après prélèvement de la nécromasse et biomasse herbacée*



*Séchage à l'air de la biomasse herbacée*





*Prélèvement de sol pour la densité apparente*



*Densité apparente de P29*



*Tri de racines*



*Inventaire botanique de la zone d'étude*





*Prélèvement de sols avant quartage*



*Echantillons de sols emballés pour expédition*



*Séchage des échantillons de sols au laboratoire US analyse CIRAD*



*Broyage des échantillons de sols au laboratoire US analyse CIRAD*



*Analyse du carbone des échantillons de sols au laboratoire US analyse CIRAD*

*Annexe 3 : Photos d'illustration de la mission Terrain Kazakhstan 2022, crédit photos Barnes, Zhun, Maeght, Stokes, Bazan, Taugourdeau et Beugnon)*

```

# Test de Kruskal-Wallis et de Wilcoxon
kruskal.test(X ~ Y,
             data = mydata)
TW = pairwise.wilcox.test(mydata$X,
                          mydata$Y,
                          p.adjust.method="none")

TW
TW = TW$p.value
TW1 = fullPTable(TW)
TW1
multcompLetters(TW1,
                compare="<",
                threshold=0.05,
                Letters=letters,
                reversed = FALSE)

```

```

library(FactoMineR)
library(factoextra)

#ACP
res.pca <- PCA(mydata_df.active, graph = FALSE)

#ACP avec variable supplémentaire
res.pca <- PCA(mydata_df, ind.sup = NULL,
               quanti.sup=1,
               quali.sup =10, graph=TRUE)

#Biplot
fviz_pca_biplot(res.pca, habillage = 10, addEllipses = TRUE, ellipse.type = "confidence", palette = "jco", repel
                = TRUE,
                col.var = "#2E9FDF")

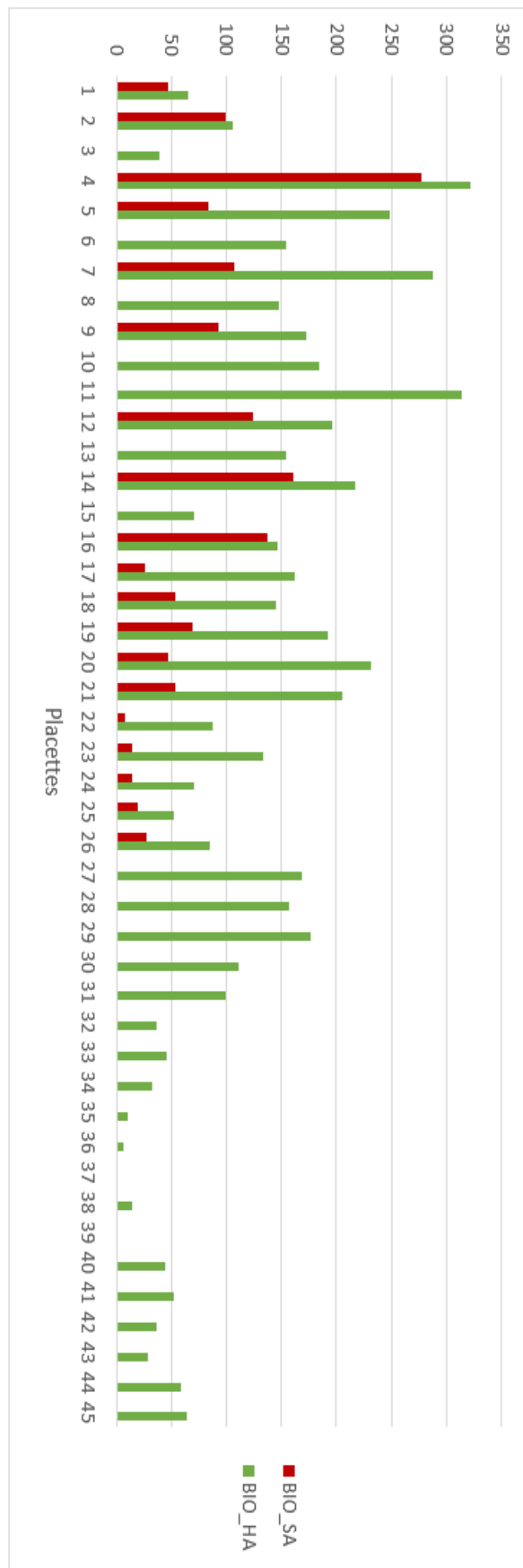
```

```

#Test de Kendall
TK<-cor.test(rank(mydata$X),rank(mydata$Y), method="kendall")
TK

```

*Annexe 4 : Codes R utilisés pour l'analyse statistique*



Annexe 5 : Diagramme comparant la biomasse sous arbre et hors arbre  
 BIO\_SA = biomasse sous arbre en g, BIO\_HA = biomasse hors arbre en g



## Lexique des nom scientifiques

- *Artemisia sp*
- *Calligonum sp*
- *Ephedra strobilacea*
- *Haloxylon ammodendron*
- *Haloxylon persicum*
- *Tamarix hispida*