

DEMOCRATIC AND POPULAR ALGERIAN REPUBLIC

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC
RESEARCH

جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف

CHADLI BENDJEDID EL TARF UNIVERSITY

كلية علوم الطبيعة والحياة

FACULTY OF NATURE AND LIFE SCIENCES

قسم البيولوجيا



Mémoire de Fin d'Études

Présenté en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master en

«Biodiversité & Environnement»

Thème

**Impact de la pollution sur la diversité floristique et les
qualités physico-chimiques de l'eau et du sol : étude
comparative de deux régions de la wilaya d'El Tarf**

Présenté Par :

Djaballah Oussama & Boutaghane Chems Eddine

Soutenue publiquement le : Lundi 15 Juin 2026

devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
MOUISSI Samia	MCA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Présidente
AMOURA Mounia	MCA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Directeur de mémoire
RAHMOUNE Houria	MAA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Co-Directeur de mémoire
BENKERMICHE Sabri	MCB	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Examineur

Année universitaire : 2025/2026

Remerciement

Avant tout, nos remerciements vont à notre **Dieu ALLAH** le Tout-Puissant, qui nous a aidés à réaliser ce travail et qui nous a donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces longues années d'étude afin que nous puissions arriver à ce niveau.

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à nos encadreurs, le **Dr AMOURA Mounia** et **Mme RAHMOUNE Houria**, qui nous ont proposé le thème de ce mémoire, ainsi que pour leurs précieux conseils et leur orientation du début à la fin de ce travail.

Nous tenons vivement à remercier le **Dr. MOUISSI Samia** de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

De même, nous exprimons notre reconnaissance au **Dr. BENKERMICHE Sabri**, pour l'honneur qu'il nous fait de bien vouloir accepter de faire partie du jury et d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement l'ensemble de nos enseignants, qui sont à l'origine de notre savoir.

Enfin, nous adressons également nos remerciements à nos amis, à nos collègues et à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide, leur soutien et leurs encouragements.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mon très cher père **Mohamed**, pour son soutien indéfectible, ses sacrifices, ses conseils précieux et sa confiance qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours.

À ma très chère mère **Halima**, symbole d'amour, de tendresse et de générosité, pour ses prières, son affection et son soutien permanent.

À mon cher oncle **Abdelhamid**, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour son aide et ses encouragements.

À mes chers frères **Anouar** et **Wahab**, ainsi qu'à ma chère sœur **Ghada**, avec toute mon affection et mes vœux de réussite, de bonheur et de prospérité.

À tous mes amis, sans aucune exception, pour leur présence, leur soutien moral et les agréables moments partagés durant ce parcours.

À mes encadreuses, Mme **Amoura Mounia** et Mme Rahmoune **Houria**, pour leur disponibilité, leurs précieux conseils, leur patience et leur accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Oussama

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mon très cher père **Ammar**, pour son soutien inestimable, ses sacrifices, ses conseils et sa confiance qui m'ont permis d'avancer avec détermination tout au long de mon parcours.

À ma très chère mère **Samah**, pour son amour infini, sa tendresse, ses prières et son soutien constant qui ont été une source de force et de motivation.

À mes chers frères et sœurs, avec toute mon affection et ma reconnaissance, en leur souhaitant réussite, bonheur et prospérité.

À tous mes amis, sans exception, pour leur présence, leur soutien moral et les précieux moments partagés durant cette période.

À mes encadreuses, Mme **Amoura Mounia** et Mme **Rahmoune Houria**, pour leur disponibilité, leur patience, leurs conseils avisés et leur accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Chems Eddine

Résumé

L'industrie cimentière est reconnue comme l'une des activités industrielles ayant un impact significatif sur l'environnement, notamment à travers ses émissions atmosphériques et leurs effets sur les écosystèmes terrestres et aquatiques.

Dans ce même contexte, l'objectif de notre étude était d'évaluer de manière quantitative et comparative l'impact de la pollution générée par la société des ciments CENTRALE A BETON sur la qualité physico-chimique des sols et des eaux avoisinantes, ainsi que sur la biodiversité végétale locale au niveau de la wilaya d'El Tarf.

Des prélèvements de sols et d'eaux ont été effectués durant la période printanière (mars-avril). Ces échantillons ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques (pH, conductivité électrique, salinité, humidité, matière organique et turbidité). Par ailleurs, les concentrations en éléments traces métalliques (Fe, Cr, Pb et Cd) ont été déterminées par spectrophotométrie UV-Visible.

Un inventaire floristique printanier comparatif, a également été mené afin d'analyser les variations de la richesse spécifique.

Les résultats obtenus révèlent une dégradation significative des caractéristiques physico-chimiques des sols et des eaux à proximité de la cimenterie. Les milieux étudiés présentent une alcalinisation marquée, une augmentation de la conductivité électrique, de la salinité, et de la turbidité, accompagnée d'une chute critique de la matière organique et de l'humidité des sols.

Concernant la contamination métallique, les analyses mettent en évidence une contamination polymétallique de la zone étudiée, avec des concentrations en fer, chrome et plomb atteignant des niveaux proches ou supérieurs aux seuils de tolérance, tandis que le cadmium représente le polluant le plus préoccupant.

Sur le plan écologique, la biodiversité végétale est fortement affectée, avec une réduction d'environ 60 % des espèces végétales, la communauté végétale chutant de 55 espèces en zone naturelle à seulement 22 espèces en zone industrielle.

Dans l'ensemble, cette étude confirme que l'activité cimentière exerce une pression environnementale importante sur les écosystèmes de la région d'Aïn Assel, entraînant une altération des sols, des eaux et de la flore locale. Des travaux complémentaires sont recommandés afin d'approfondir l'évaluation de la bioaccumulation des métaux lourds et le suivi à long terme des impacts environnementaux.

Mots-clés : cimenterie, pollution industrielle, sol, eau, métaux lourds, biodiversité végétale, Aïn Assel, El Tarf.

Abstract

The cement industry is recognised as one of the industrial sectors that has a significant impact on the environment, particularly through its atmospheric emissions and their effects on terrestrial and aquatic ecosystems.

In this context, the aim of our study was to assess quantitatively and comparatively, the impact of pollution generated by the CENTRALE A BETON cement company on the physico-chemical quality of the surrounding soil and water, as well as on local plant biodiversity in El Tarf state.

Soil and water samples were collected during the spring season (March–April). These samples were subjected to physico-chemical analysis (pH, electrical conductivity, salinity, moisture content, organic matter and turbidity). In addition, concentrations of trace metals (Fe, Cr, Pb and Cd) were determined by UV-Vis spectrophotometry. A comparative floristic survey was also conducted to evaluate variations in plant species richness between the study sites.

The results revealed a significant deterioration in the physico-chemical characteristics of the soil and water around the the cement company. The environments studied show marked alkalisation, an increase in electrical conductivity, salinity and turbidity, accompanied by a critical decline in organic matter and soil moisture.

Metal analyses further indicated significant polymetallic contamination, with iron, chromium, and lead occurring at levels close or exceeding recommended standards, while cadmium emerged as the most critical contaminant.

From the ecological perspective, plant biodiversity was severely impacted, with plant species decrease with approximately 60%, from 55 species recorded in the reference area to only 22 species in the industrial zone.

Overall, the findings demonstrate that cement industry exerts significant environmental pressure on the ecosystems of Aïn Assel region, leading to the degradation of soil, water and local flora. Further investigations are recommended to assess heavy metal bioaccumulation and to establish long-term monitoring programs for environmental impact assessment.

Keywords: cement industry, industrial pollution, soil, water, heavy metals, plant biodiversity, Aïn Assel, El Tarf.

الملخص

تُعدّ صناعة الإسمنت من القطاعات الصناعية المعروفة بتأثيرها الكبير على البيئة، ولا سيما من خلال انبعاثاتها الجوية وما تسببه من آثار على النظم البيئية البرية والمائية.

تقريباً كميّاً ومقارناً CENTRALE A BETON في هذا السياق، هدفت دراستنا إلى تقييم تأثير التلوث الصادر عن شركة الإسمنت على الجودة الفيزيائية والكيميائية للتربة والمياه المحيطة، وكذلك على التنوع النباتي المحلي بولاية الطارف.

، (pH) تم جمع عينات من التربة والمياه خلال فصل الربيع (مارس-أفريل)، وأخضعت لتحاليل فيزيائية وكيميائية شملت قياس الكروم Fe التوصيلية الكهربائية، الملوحة، الرطوبة، المادة العضوية، والعكارة). كما تم قياس تراكيز العناصر المعدنية (الحديد ، كما أُجري مسح (UV) باستخدام تقنية المطيافية الضوئية بالأشعة فوق البنفسجية والمرئية Cd ، والكاديوم Pb ، والرصاص Cr ، نباتي مقارن لتقييم الاختلافات في الأنواع النباتية بين مواقع الدراسة. التغيرات في الغنى النوعي للنباتات بين المواقع المدروسة.

أظهرت النتائج تدهوراً ملحوظاً في الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة والمياه المحيطة بمصنع الإسمنت. وقد تميزت الأوساط المدروسة بارتفاع واضح في القلوية، وزيادة في التوصيلية الكهربائية والملوحة والعكارة، مصحوبة بانخفاض حاد في محتوى المادة العضوية ورطوبة التربة.

كما بينت التحاليل المعدنية وجود تلوث بالمعادن بدرجة معتبرة، حيث سُجلت تراكيز للحديد والكروم والرصاص عند مستويات قريبة أو متجاوزة من الحدود الموصى بها، في حين تبين أن الكاديوم الملوث الأكثر خطورة.

ومن الناحية البيئية، تأثر التنوع النباتي بشكل كبير، إذ انخفض عدد الأنواع النباتية بحوالي 60%، من 55 نوعاً نباتياً مسجلاً في المنطقة المرجعية إلى 22 نوعاً فقط في المنطقة الصناعية. ويبرز هذا التراجع الكبير مدى حساسية الغطاء النباتي المحلي تجاه التلوث الصناعي وتدهور الموائل الطبيعية.

بشكل عام، تُظهر النتائج أن صناعة الأسمنت تمارس ضغطاً بيئياً ملحوظاً على النظم البيئية في منطقة عين العسل، مما يؤدي إلى تدهور التربة والمياه والغطاء النباتي المحلي. ويوصى بإجراء دراسات إضافية لتقييم ظاهرة التراكم الحيوي للمعادن الثقيلة ووضع برامج رصد طويلة المدى لتقييم الآثار البيئية.

الكلمات المفتاحية: صناعة الإسمنت، التلوث الصناعي، التربة، المياه، المعادن الثقيلة، التنوع النباتي، عين العسل، الطارف.

SOMMAIRE

Liste des tableaux.....	
Liste des figures.....	
Introduction.....	01

Première partie / SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 01 : Environnement, pollution.....	
1.1. Définition de l'environnement.....	03
1.2. Définition de la pollution.....	03
1.3. Les types de pollution	03
1.3.1. La pollution atmosphérique	03
1.3.2. La pollution des sols.....	04
1.3.3. La pollution des eaux	05
1.3.4. La pollution sonore	05
1.3.5. Classification de la pollution.....	05
1.4.1. Pollution physique	06
1.4.2. Pollution chimique	06
1.4.3. Pollution biologique	06
1.4.4 Nuisances esthétiques	06
1.5. Les métaux lourds : Définition et origine.....	06
1.5.1. Différent types de métaux lourds	08
1.6. Conséquences de la pollution sur l'homme et l'environnement	12
1.6.1. Conséquences de la pollution sur la biodiversité.....	14
Chapitre 02 : Pollution industrielle – Cas des cimenteries	
2.1. Le ciment	16
2.1.1. Définition	16
2.1.2. Les principaux ingrédients du ciment.....	17
2.1.3. Etapes de fabrication.....	17
2.2. Sous-produits de la fabrication du ciment.....	20
2.3. Sources de pollution dans les cimenteries.....	20

2.3.1. Émissions de poussières.....	21
2.3.2 Émissions gazeuse.....	21
2.3.4. Impact sur les sols.....	22
2.3.5. Impact sur les ressources en eau.....	23
2.3.6. L'impact de la pollution sur la biodiversité.....	23

Deuxième partie : PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre 03 : Matériel & Méthodes

3.1. Présentation de la zone d'étude et des stations d'échantillonnage.....	25
3.2. Caractéristiques naturelles et conditions climatiques	26
3.2.1. Relief et morphologie	26
3.2.2. L'étude climatique.....	26
3.2.2.1. Caractéristiques climatiques	27
3.2.3. Diversité biologique de la région.....	29
3.2.3.1. Richesse floristique	30
3.2.3.2. Richesse faunistique	30
3.3. Stratégie d'échantillonnage et prélèvement des milieux	30
3.3.1. Prélèvement des échantillons de sol.....	30
3.3.2. Prélèvement des échantillons d'eau	31
3.4. Méthodes de travail : analyses au laboratoire.....	32
3.4.1. Analyses physico-chimiques et métalliques des matrices.....	32
3.4.1.1. Caractérisation physico-chimique des sols et des eaux	32
3.4.2. Protocoles d'extraction des métaux lourds dans le sol	33
3.4.2.1. Extraction du Fer (Fe) et du Chrome (Cr).....	33
3.4.2.2. Extraction du Plomb (Pb) et du Cadmium (Cd).....	34
3.4.3. Étude de la biodiversité végétale (Approche comparative).....	35
3.4.3.1. La méthode des inventaires floristiques.....	35
3.4.3.2. Identification taxonomique.....	35
3.4.3.3. Calcul des indices écologiques.....	35
3.5. Analyses statistiques	35

Chapitre 04. Résultats & Discussion.....

4.1. Caractérisation physico-chimique des matrices (Sol et Eau).....	37
4.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des échantillons de sol	37

4.1.2. Caractéristiques physico-chimiques des échantillons d'eau.....	38
4.2. Évaluation quantitative des métaux lourds (Éléments Traces Métalliques).....	38
4.2.1. Charge métallique de la matrice sol.....	38
4.2.2. Charge métallique de la matrice eau.....	39
4.3. Analyse comparative de la diversité végétale.....	40
4.3.1. Inventaire de la zone naturelle (Station Témoin).....	40
4.3.2. Inventaire de la zone industrielle (Station Cimenterie).....	41
5.1. Richesse spécifique et glissement des équilibres taxonomiques.....	43
VI. CONCLUSION & PERSPECTIVES.....	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	

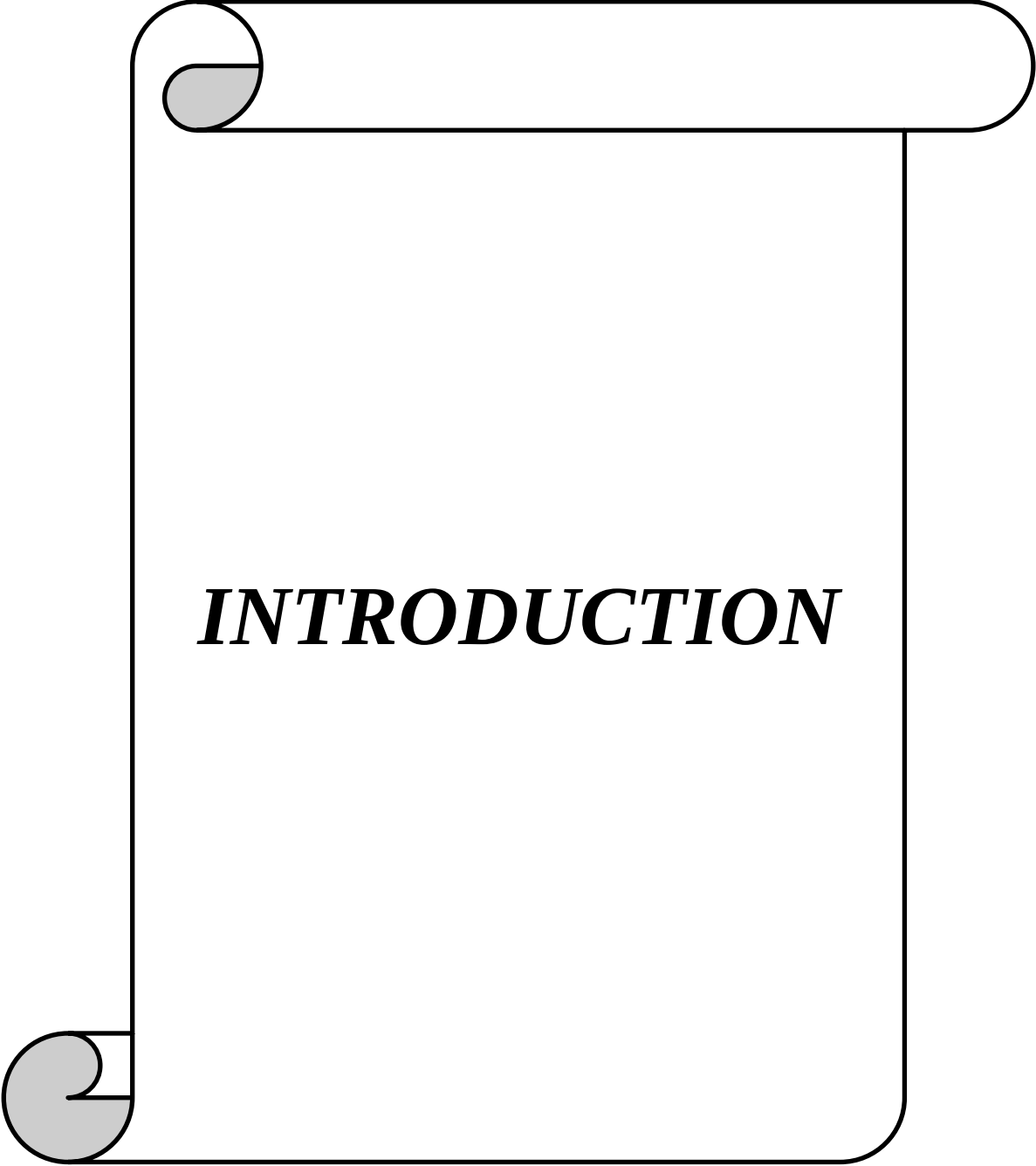
ANNEXES

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
1	Classification périodique des éléments (Huynh., 2009).	7
2	Origine des métaux lourds dans le sol (Huynh., 2009).	8
3	Poudre de ciment	16
4	Ingrédients du ciment	17
5	Procédé de fabrication du ciment.	20
6	Localisation de la cimenterie CENTRALE A BETON (Commune de Aïn Assel, Wilaya d'El Tarf) et positionnement des sites de prélèvement du sol.	26
7	Température moyenne mensuelle (2002-2012) ; Source: Station météorologique d'El Kala.	28
8	Précipitation moyenne mensuelle (2002-2012) ; (Source: barrage El Chafia)	29
9	Pourcentage d'espèces prospectées des deux stations industrielle et naturelle (Témoin).	43

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
1	Principaux polluants leurs origines, leurs effets sur l'environnement et la santé humaine. (Rechatin et Lavoux, 1997).	12
2	Composition générale du cru. (Mungyeko Bisulandu et Marias, 2019)	19
3	Caractéristiques physico-chimiques des échantillons de sol des deux stations.	37
4	Caractéristiques physico-chimiques des échantillons d'eau des deux stations.	38
5	Teneurs en métaux lourds du sol de la station industrielle (Sol N°2).	39
6	Teneurs en métaux lourds de l'eau de la station industrielle (Eau N°2).	39
7	Abondance et distribution des plantes au niveau de la station témoin (Zone Naturelle).	40
8	Abondance et distribution des plantes au niveau de la station industrielle (Zone Cimenterie).	41



INTRODUCTION

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les écosystèmes terrestres et aquatiques subissent aujourd'hui une pression anthropique sans précédent, consécutive au développement industriel, à l'urbanisation galopante et à l'intensification des pratiques agricoles (Azimi *et al.*, 2005). Parmi les sources de pollution industrielle les plus sévères, l'industrie du ciment est reconnue à l'échelle mondiale comme une activité hautement pourvoyeuse de nuisances environnementales. Les complexes cimentiers libèrent continuellement dans l'atmosphère de grandes quantités de poussières de clinker et de gaz riches en éléments traces métalliques (ETM) tels que le plomb, le cadmium et le chrome (Bilen, 2010). Ces polluants atmosphériques finissent par se sédimenter sur les compartiments biophysiques périphériques, altérant durablement les équilibres écologiques locaux (Kabata-Pendias, 2011).

Le sol et l'eau, matrices fondamentales de la biosphère, agissent comme des récepteurs et des accumulateurs de ces retombées industrielles. L'accumulation de poussières silico-calcaires provoque généralement une modification profonde des propriétés physico-chimiques des sols et des eaux de surface, caractérisée par une alcalinisation des milieux et une augmentation artificielle de la conductivité électrique (Nriagu, 1996). Plus grave encore, l'enrichissement de ces matrices en métaux lourds hautement toxiques, à l'image du cadmium, pose un problème écotoxicologique majeur en raison de leur rémanence et de leur capacité à intégrer les réseaux trophiques par bioamplification (Alloway, 2013).

Cette dégradation de la qualité biotique des sols et des eaux exerce une pression sélective drastique sur la biodiversité végétale (Flora *et al.*, 2014). Les stress chimiques et physiques induits par la pollution cimentière perturbent les fonctions physiologiques des plantes, limitent la germination et conduisent inévitablement à l'exclusion des espèces sensibles au profit de taxons rudéraux ou opportunistes plus tolérants (Ernst, 1998). Il en résulte une homogénéisation et un appauvrissement global de la richesse spécifique des phytocénoses.

La wilaya d'El Tarf, située à l'extrême Nord-Est de l'Algérie, constitue un cadre d'étude d'un intérêt écologique exceptionnel. Reconnue pour sa biodiversité remarquable, ses zones humides d'importance internationale (classées Ramsar) et ses massifs forestiers de chêne-liège, cette région fait face à une vulnérabilité croissante liée à l'implantation d'infrastructures industrielles, à l'instar du complexe cimentier d'Aïn Assel. Évaluer l'empreinte de cette activité sur un écosystème originellement préservé devient donc une urgence environnementale.

INTRODUCTION

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail de recherche, qui pose la problématique suivante : Dans quelle mesure l'activité industrielle de la cimenterie d'Aïn Assel altère-t-elle la qualité physico-chimique et métallique des sols et des eaux environnants, et quelles en sont les répercussions directes sur la structure de la diversité floristique locale ?

Pour répondre à cette question, nous émettons l'hypothèse que les retombées particulières du complexe industriel induisent une dégradation chimique conjointe du sol et du réseau hydrographique périphérique, matérialisée par une alcalinisation et une pollution métallique aiguë, ce qui provoque une rupture d'équilibre de la biodiversité végétale par rapport à une zone naturelle préservée.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer de manière quantitative et comparative l'impact de la pollution issue de la cimenterie sur l'écosystème de la plaine d'Aïn Assel dans la wilaya d'El Tarf. Plus spécifiquement, ce travail vise à :

1. **Caractériser la qualité physico-chimique** des matrices sol et eau (pH, conductivité électrique, salinité, humidité, matière organique et turbidité) en comparant une zone soumise à l'influence industrielle et une zone naturelle de référence.
2. **Quantifier la charge métallique** en dosant quatre éléments clés (Fer, Chrome, Plomb et Cadmium) au sein des deux matrices afin d'identifier d'éventuels dépassements des seuils critiques et des normes écotoxicologiques (OMS, directives européennes).
3. **Évaluer l'impact sur la diversité végétale** en réalisant un inventaire floristique printanier comparatif, dans le but d'analyser les variations de la richesse spécifique,

Pour atteindre ces objectifs, notre manuscrit s'articule autour de trois grandes parties : une synthèse bibliographique faisant le point sur la pollution industrielle et ses impacts, une section matériels et méthodes décrivant les protocoles analytiques standardisés utilisés, et enfin, la présentation des résultats obtenus suivie d'une discussion approfondie ouvrant sur quelques perspectives de remédiation écologique.

A stylized graphic of a scroll. It features a horizontal bar at the top with a rounded right end and a small grey-shaded semi-circle on its left side. A vertical line descends from the right end of this bar, forming the right edge of a large rectangular frame. The left edge of the frame is composed of a vertical line and a large grey-shaded semi-circle at the bottom left corner. The text is centered within this frame.

Première partie
Synthèse
Bibliographique

Chapitre01
Environnement
pollution

Chapitre 01. Environnement, pollution

Chapitre 01 : Environnement, pollution

1.1. Définition de l'environnement : C'est l'ensemble des conditions naturelles (physique, chimique et biologiques) et culturelles (sociologiques) dans lesquelles les organismes vivants (et en particulier l'homme) se développent (Fonton, 2003).

1.2. Définition de la pollution : La définition la plus universel du terme de pollution a été donnée par le premier rapport du conseil sur la qualité de l'environnement de la maison blanche (1965) : « Une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, par des effets directs ou indirects altérant les critères de répartition de flux d'énergies, des niveaux de radiations, de la constitution physicochimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes ; ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou via des ressources agricoles, en eau et en produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède ou les possibilités récréatives du milieu » (Ramade, 2000 ; De Redon, 2021).

1.3. Les types de pollution

1.3.1. La pollution atmosphérique

Plusieurs définitions ont été développées pour expliquer la pollution de l'atmosphère, on cite parmi elles : - La pollution est définie par l'organisation mondiale de la santé (OMS) comme étant « la présence dans l'atmosphère de substances étrangères à la composition normale de cette atmosphère et à des concentrations suffisamment élevées pour entraîner un impact sur l'homme, les animaux, les végétaux, les matériaux ou l'environnement d'une manière générale » (OMS, 2005).

Au sens de la Loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement, on entend par pollution de l'atmosphère, « l'émission dans l'atmosphère de gaz, de fumées ou de particules solides ou liquides, corrosives, toxiques ou odorantes, de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétaux, à la production agricole et aux produits agroalimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites » (Ministère de l'environnement t, 1983).

Pacyna et Graedel (1995) définissent la pollution de l'air comme « la résultante de multiples facteurs : croissance de la consommation d'énergie, développement des industries extractives, métallurgiques et chimiques, de la circulation routière et aérienne, de l'incinération des ordures ménagères, des déchets industriels, etc ». Par conséquent, la

Chapitre 01. Environnement, pollution

pollution de l'air est donc le résultat de présence dans l'atmosphère de plusieurs agents polluants, à savoir ; les fumées, les gaz, les particules liquides ou solides et d'autres produits de simple combustion que l'on associe à la nuisance, aux maladies, aux épidémies, à l'agression de l'environnement, à la dégradation du cadre de vie et le déséquilibre des écosystèmes, au réchauffement de la planète, aux catastrophes écologiques, et au dérèglement du système climatique (OMS, 2000).

1.3.2. La pollution des sols

On dit qu'un sol est pollué lorsqu'il contient une concentration anormale de composés chimiques potentiellement dangereux pour la santé, des plantes ou des animaux. La contamination se fait alors soit par voie digestive (consommation d'eau polluée par exemple), ou par voie respiratoire (poussières des sols pollués dans l'atmosphère) (Duchaufour, 2001). Un sol contaminé peut présenter trois types de risques environnementaux qui se traduiront en risque sur la santé humaine : (Ngô et Alain, 2004)

1. Le contact direct des polluants avec les occupants du sol, pourra avoir des effets nocifs sur le système respiratoire, les irritations aux yeux....
2. Lessivage des polluants par les eaux d'infiltration et transfert des polluants vers les eaux souterraines et superficielles (pollution possible des ressources en eau).
3. Réintroduction des polluants dans la chaîne alimentaire par les végétaux et les organismes vivants du sol.

Nous pouvons citer quelques exemples de sources anthropiques de la dégradation des sols :

1. Les activités humaines intensives, en particulier la production agricole et industrielle, ont conduit à une accumulation de métaux lourds dans les sols agricoles, menaçant la qualité environnementale des sols et la sécurité des produits agricoles (Hu et *al.*, 2018) ;
2. La sur-urbanisation de sols à vocation agricole : les surfaces bétonnées qui couvrent le sol empêchent l'eau de pénétrer dans la terre et sans eau, aucune vie ne peut se développer ;
3. Les émissions intenses des rejets toxiques et polluants riches en métaux lourds par les industries et par la circulation automobile ; - Le dépôt et l'accumulation des boues de station d'épuration, des déchets industriels et ménagers sur les sols sous forme de décharges autorisées ou sauvages (Mouhoun, 2019).

Chapitre 01. Environnement, pollution

1.3.3. La pollution des eaux

La pollution des eaux consiste en des déversements, écoulements, rejets, dépôts directes ou indirectes de matières de toute nature et le plus généralement tout a fait susceptible de provoquer ou d'accroître la dégradation des eaux, en modifiant leurs caractéristiques physiques, biologiques ou bactériologiques, qu'il s'agisse d'eaux superficielles, souterraines ou des eaux de mer, dans la limite des eaux territoriales (Oliver, 2005). Dans les divers processus de fabrication, l'eau sert comme solvant, agent de refroidissement et agent de nettoyage, cette eau est rejetée en bout de chaîne souvent sous une forme polluée. La pollution des cours d'eau par des produits chimiques est devenue l'un des problèmes majeurs de l'environnement (Koller, 2004).

1.3.3.1. Origine de la pollution des eaux

On en distinguera 4 types de pollutions : la pollution domestique, la pollution domestiquée urbaines, la pollution industrielle, la pollution agricole et la pollution naturelle. On distingue les types suivants :

1.3.3.1.1. Pollution naturelle

La teneur de l'eau et substances indésirables n'est pas toujours le fait de l'activité humaine, certains phénomènes naturels sont également à l'origine de la pollution de l'eau (par exemple une irruption volcanique, un épanchement sous-marins d'hydrocarbures, le contact avec les filons géologiques (métaux, arsenic) une source thermo minérale...).

1.3.4. La pollution sonore

Avec le développement des techniques, le bruit ambiant a augmenté ces dernières décennies de plusieurs dizaines de décibels. Cette pollution par le bruit est un important problème d'environnement, notamment lorsque les niveaux sonores dépassent certaines valeurs pouvant provoquer des dommages physiques. Mise à part le bruit il y a les vibrations qui sont occasionnées par les moyens de transport lourds. Ces vibrations peuvent provoquer des dégâts considérables à l'être humain au niveau de l'oreille et du système nerveux, mais aussi aux bâtiments car ils pourraient être la cause de fissures dans la structure (Tabet, 1998).

1.4. Classification de la pollution

Pour la classification classique, le phénomène de pollution envisageant ce qui se passe au niveau du sol, de l'air et de l'eau. Mais, actuellement, elle peut se faire selon la nature du facteur ou d'agent polluant considéré (Aissaoui, 2012).

Chapitre 01. Environnement, pollution

1.4.1. Pollution physique

- Radionucléides actifs ;
- Caléfaction (pollution thermique) ;
- Bruit et vibrations à base fréquence (infrasons)

1.4.2. Pollution chimique : Parmi les principaux polluants impliqués dans la pollution chimique : dérivés gazeux du carbone et hydrocarbures liquides, matière plastiques, pesticides, les métaux lourds,... etc.

1.4.3. Pollution biologique

- Contamination biologique des milieux inhalés et ingérés (bactérie, virus, pollens,... etc).
- Modification des biocénoses par introduction intempestive d'espèces animales et végétales.

1.4.4 Nuisances esthétiques

- Dégradation des paysages et des sites par l'urbanisation « sauvage » ou un aménagement mal conçu.
- Implantation d'industrie ou autres activités dans les biotopes vierges ou peu modifiés par l'homme (Viala, 1998 in Aissaoui, 2012).

1.5. Les métaux lourds : Définition et origine

Dans la littérature, les « métaux lourds » sont parfois désignés par les appellations suivantes : métaux ou éléments traces, métaux de transition, micro-nutriments et métaux toxiques. Rigoureusement, un métal dit « lourd » se définit comme un métal dont la masse volumique est supérieure à 5 g/cm³, à l'exception des éléments alcalino-terreux (Galvez-Cloutier et Le François, 2005). On appelle également parfois « métaux lourds » les métaux situés à partir de la quatrième période du tableau périodique c'est-à-dire à partir du potassium (Sirven, 2006) (figure 2). Le terme métaux lourds, « heavy metal », implique aussi une notion de toxicité. Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement (Huynh, 2009).

Dans ce contexte, nous utiliserons le terme « métaux lourds » dans le sens de l'impact toxique sur les humains et les environnements.

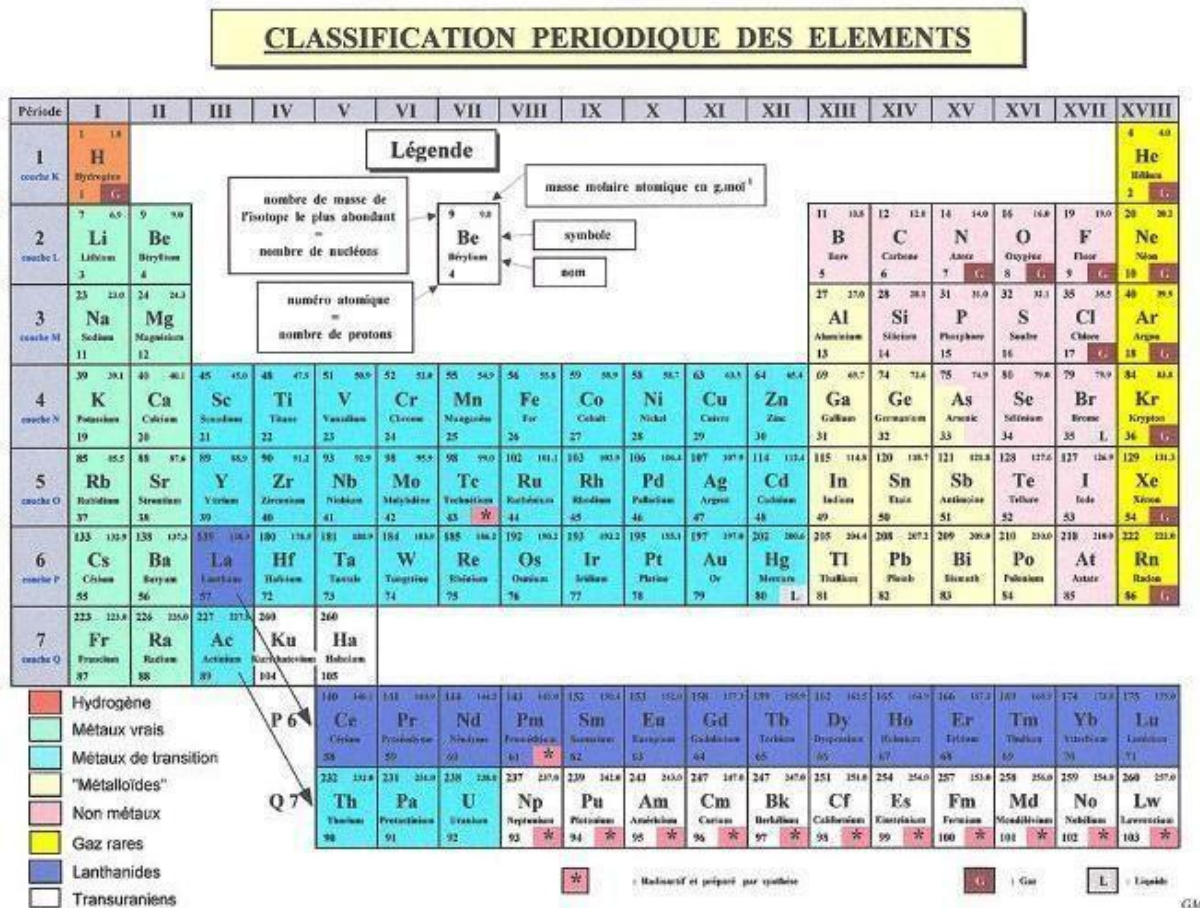


Figure 1 : Classification périodique des éléments (Huynh., 2009).

Selon Galvez de Cloutier (1995), les principaux métaux lourds impliqués dans les cas de contamination des sols sont le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le chrome (Cr) et le mercure (Hg). Les métaux lourds sont présents naturellement dans les sols (Mitra *et al.*, 2022, Khan *et al.*, 2023) selon des concentrations qui sont directement influencées par la nature du socle rocheux local ainsi que les divers processus d'altération auxquels ont été et sont exposées les formations géologiques. Ainsi, un sol contenant des métaux lourds ne peut donc pas a priori être nécessairement considéré comme contaminé (Galvez-Cloutier et Le François, 2005). Selon Nowak *et al.*, (2002), les activités industrielles sont la principale origine de la pollution des sols par des composants métalliques. Voici ci-dessous quelques exemples (figure 3): - Métallurgie : Fe, Mn, Pb, Zn, Cd, Cr et Ni ; - Incinération de déchets : Cd, Cu, Cr et Pb ; - Traitement et épandage de déchets, utilisation de fertilisants et phytosanitaires en agriculture : As, Cd, Mn, Cu, Pb et Zn.

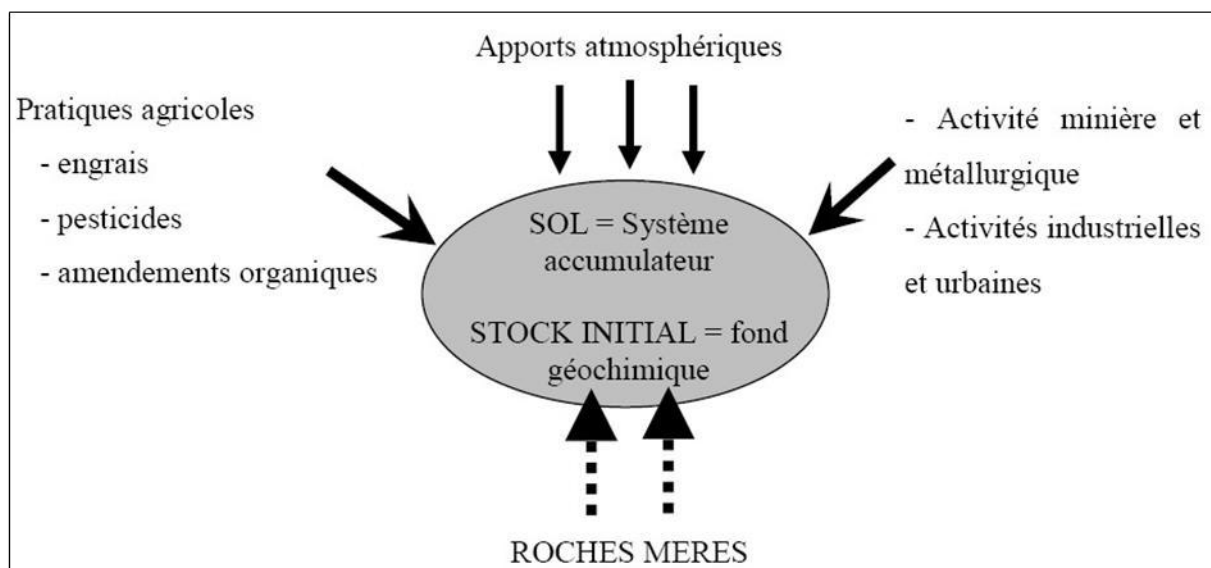


Figure 2. Origine des métaux lourds dans le sol (Huynh, 2009).

1.5.1. Différent types de métaux lourds

On en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux lourds essentiels et métaux lourds toxiques.

1.5.1.1. Métaux lourds essentiels

Les métaux essentiels sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Huynh, 2009) et peuvent être toxiques à des concentrations supérieures à un certain seuil, comme le Cu, le Fe, le Mn, le Ni et le Zn (Napoletano *et al.*, 2023)

1.5.1.2. Métaux lourds non essentiels

Ces éléments qui ne présentent pas une fonction métabolique, sont connus comme « nonessentiels » et généralement ont un seuil de concentration beaucoup plus bas pour devenir toxiques. Ces éléments non essentiels sont : As, Cd, Pb, U, Hg, Sb, Tl et Pu (Aranguren, 2008).

1.5.1.3. Pollution des sols par des métaux lourds

Un sol est considéré pollué lorsque la dégradation de sa qualité par l'apport anthropique d'élément toxique peut porter atteinte à la santé humaine ou/et à l'environnement. La présence d'un polluant dans le sol n'est pas en soit un danger, le risque apparaît dès que ce

Chapitre 01. Environnement, pollution

polluant peut être mobilisé et agit sur l'environnement (faune, flore) ou sur l'homme. La pollution des sols et sous-sols résulte des conséquences cumulées au cours du temps des diverses activités humaines tant industrielles qu'agricoles, urbaines, militaires etc. Cette contamination trop négligée jusqu'à une époque récente est préoccupante par ses conséquences sanitaire, environnementale et socio-économiques (Benahmed, 2017).

1.5.1.4. Pollution domestique et urbaine

Les eaux usées urbaines peuvent être définies comme les eaux qui sont dégradées par les activités des hommes. Elles correspondent à ; l'eau que nous consommons à la maison pour les différents besoins quotidiens, aller aux toilettes, faire la vaisselle, se laver les mains...), on distingue :

Les eaux ménagères qui ont pour origine les salles de bain, les cuisines. Elles contiennent des solvants, des graisses et des débris organiques et Les eaux vannes s'appliquent aux rejets des toilettes. Elles sont chargées de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux.

L'eau résultante des activités domestiques (fabriquer du yaourt, entretenir garage automobile, les magasins, les marchés...) des établissements et les installations collectives (les hôpitaux, les écoles, les hôtels, les restaurants, université, secteur sanitaires...)(La STEP ,2019).

On estime que la pollution journalière produite par une personne consomment 200 litres d'eau est évaluée comme suit: 70 à 90 g de matières en suspension, 60 à 70 g de matières organiques, 15 à 17 g de matières azotées, 4 g de phosphore, plusieurs milliards de germes pour 100 ml (BICARDOT, 2002).

1.5.1.5. La pollution industrielle

Les entreprises utilisent de l'eau dans les processus (refroidissement, lavage, extraction, mise en solution, etc.) et l'activité de l'usine (chimie, traitement de surface, agroalimentaire, etc.) (Genin et al., 2003), participant à la pollution organique. Elle est par conséquent, responsable en grande partie des rejets toxiques (CRE, 2002). L'eau recèle tous les sous-produits possibles de l'activité humaine :

- Matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, abattoirs et équarrissages).

Chapitre 01. Environnement, pollution

- Hydrocarbures (raffineries).
- Acides, bases, produits chimiques divers (industries chimiques et pharmaceutiques, tanneries).
- Eau chaude (centrales thermiques).
- Matières radioactives (centrales nucléaires, centres de recherche, hôpitaux) (Genin et al, 2003). Du fait des anciens dépôts ou d'infiltration des substances polluantes d'origine fossile ou de métaux : plomb zinc, ces sites pollués peuvent rencontrer des fermetures de captage présentant une pollution qui peuvent porter atteinte aux individus aussi bien qu'à l'environnement (CRE, 2002). La plus spectaculaire, elle est donc plus facile à localiser, pour mettre en jeu la responsabilité des entreprises et ainsi faire réviser leurs installations (Muckenstuem , 1973).

1.5.1.6. La pollution agricole

L'agriculture est aujourd'hui le principal émetteur d'azote et le deuxième en phosphore (CRE, 2002), elle est aussi devenue par les innovations qui l'ont révolutionnée un facteur de pollution. Elle aura à son passif la pollution des eaux par ses rejets affectant les eaux de surface tout comme les nappes et voies souterraines (Ongley, 1996).

Aux pratiques agricoles s'ajoutent des caractéristiques climatiques et agro-pédologiques qui accentuent les risques de pollutions (CRE, 2002). Parmi les caractéristiques de la pollution agricole, on citera :

- Les fortes teneurs en sels minéraux (azote, phosphore, potassium), provenant d'engrais et d'effluents d'élevage (fumiers, lisiers).
- Les substances oxydables issues de sous-produits d'élevage et des lavages d'aires (matières organiques, ammoniac).
- La présence de produits chimiques de traitement des cultures (produits phytosanitaires).
- La présence épisodique dans les effluents d'élevage de produits sanitaires (bactéricides, antibiotiques) (Genin et al., 2003).

1.5.1.7. Pollution atmosphérique

L'atmosphère terrestre contient en effet des polluant (gaz, vapeur, fumé, poussière...) qui rejoignent le sol lorsqu'il pleut, ces pollutions contaminent alors les eaux de surface ainsi qu'ils peuvent contaminer les eaux souterraines. (PERINGER, 2005). La pollution engendrée varie, d'ordre physique (radioactivité, hausse de la température...), chimique (rejets agricoles, industriels et urbains) et microbiologique (déjections urbains, élevage...) ou thermique.

1.5.1.8. Paramètres physique

- A. Température :** C'est un paramètre important surtout pour les eaux usées industrielles (principalement les industries agro-alimentaires les centrales nucléaires...) qui produisent des eaux chaudes. l'émission d'une eau propre mais chaude dans un milieu naturel peut créer une pollution.(ONED ,2023).
- B. Conductivité électrique :** Elle sert à mesurer la quantité de sels dissous. Le poids de sel est représenté par le produit de cette conductivité avec le volume d'eau rejetée (ONED ,2023).
- C. pH (potentiel hydrogène) :** Le pH est en relation avec la concentration des ions hydrogène $[H^+]$ présent dans l'eau ou les solutions, Le potentiel de l'électrode est lié à l'activité des ions $[H^+]$.Le PH doit être compris entre 6.5 et 8.5. Le pH est mesuré avec une électrode en verre. (ONED ,2023).
- D. Salinité :** La salinité totale d'une eau correspond a total des actions et des anions présents ; exprimé en $mg\ l^{-1}$ (ONED 2023).
- E. Turbidité :** La turbidité des effluents résiduaires et des eaux polluées est en général très élevée, elle ne peut de ce fait être exprimée en gouttes de silice ou de mastic. La turbidité est donc définie par absorptiomètre. Le mestre est effectué au moyen d'un spectrophotomètre à 720 nm, car à cette longueur d'onde l'influence de la couleur est négligeable. Pour éviter l'interférence due à la présence de grosses particules décantables, il convient de les éliminer au préalable par décantation (ONED 2023).
- F. PH :** Le pH est indice, traduisant le degré d'acidité et de basicité du milieu, est exprimé par le logarithme de l'inverse de la concentration en ions H_3O^+ (Koller , 2004). Il est calculé selon la formule suivante :

$$pH = \log (1/H^+)$$

Chapitre 01. Environnement, pollution

Le pH varie selon les saisons et le pouvoir tampon (Gobat et al., 2003). De nombreux animaux ne peuvent vivre qu'entre certaines limites de pH bien précises, d'autres, au contraire, sont très tolérants aux variations d'acidité du milieu (Bachelier, 1978).

1.6. Conséquences de la pollution sur l'homme et l'environnement

La pollution a des effets sur la santé et sur l'environnement, ils sont représentés dans le tableau n°1.

Tableau 01: Principaux polluants leurs origines, leurs effets sur l'environnement et la santé humaine. (Rechatin et Lavoux, 1997).

Polluant	Origine	Effet sr la santé	Effet sur l'environnement
Atmosphère			
Monoxyde de carbone (CO)	Produit par les moteurs à essence et la circulation routière.	Il diminue la capacité d'oxygénation du cerveau, du cœur et des muscles, nocif pour le fœtus.	Formation de la Pollution photochimique.
Oxyde d'azote (NOx)	Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO ₂) sont principalement produits par les transports, centrales thermiques, combustion industrielle.	Il altère l'activité respiratoire et augmente les crises Chez les asthmatiques.	Pluies acides, formation de l'ozone de la basse atmosphère, pollution photochimique.

Chapitre 01. Environnement, pollution

Le dioxyde de Carbone (CO₂)	déforestation, combustion de combustibles fossiles.	Asphyxie, gelure, Dommages des reins ou coma	Gaz à effet de serre
Le dioxyde de soufre (SO₂)	Combustion des combustibles fossiles, la fabrication d'acide sulfurique, l'incinération des ordures .Les volcans	Gaz irritant peut entraîner des crises chez les asthmatiques	Pluies acides, dégradation de Certaines constructions, changement des caractéristiques du sol.
Méthane (CH₄)	Fermentation des matières organiques, combustion	Asphyxie	Gaz a effet de serre
Chlorofluorocarbure (CFC)	Artificiels (aérosol, mousses, extincteurs, réfrigérants, etc)	–	Dégradation de la couche d'ozone
L'ozone (O₃)	Produit dans la basse atmosphère par interaction entre les ultraviolets et les gaz tels que CO, SO ₂ , NOx, COV et hydrocarbures	Gaz agressif, fortement irritant pour les muqueuses oculaires et respiratoires.	Perturbe l'activité photosynthétique des végétaux, diminue la productivité des cultures et provoque des lésions caractéristiques, Sécheresse pauvreté des sols, contribue à l'effet de serre.
Composés organiques volatils (COV)	Proviennent des hydrocarbures (benzène, 1-3butadiène) émis dans les gaz d'échappement et des solvants.	Irritants pour les yeux, gorge, nez, poumons. Capacité respiratoire diminuée. Risques d'effets cancérogènes.	Formation d'ozone dans la basse Atmosphère.

Chapitre 01. Environnement, pollution

Plomb (Pb)	Provient des hydrocarbures plombés. industrie des métaux non ferreux, circulation automobile.	Modifie la composition du sang en gênant la fabrication de l'hémoglobine.	Pollution de l'air par le plomb
Eau			
Nitrate, phosphates	Activités agricoles	–	Pollution des eaux d'origine agricole : les nitrates
Rejets industriels : MO, MES, polluants toxiques	Activité industrielle, traitement de surface	–	Pollution industrielle des eaux
contamination microbiologique, toxique	plomb : canalisations en plomb nitrates : activité agricole	Qualité des eaux destinées à la consommation humaine	–
contamination microbiologique	eaux usées et pluviales non traitées, activité agricole	Qualité des eaux de baignade	–
Sol			
Substances polluantes	activités anthropiques	–	Sites et sols pollués

1.6.1. Conséquences de la pollution sur la biodiversité

L'évaluation mondiale de l'Ipbes publiée en 2019 identifie la pollution comme le 4ème facteur de pression le plus important sur la biodiversité. La pollution correspond à une dégradation de l'environnement par des substances, des déchets ou des nuisances diverses. Il peut s'agir de particules fines, de gaz à effet de serre, de métaux lourds, de substances chimiques ou de matériaux non dégradables comme les plastiques.

Chapitre 01. Environnement, pollution

La pollution issue des processus de transport et de redistribution de l'azote réactif impacte fortement les écosystèmes terrestres. Les fuites d'azotes se font multiples tout au long des chaînes de transformation agricole : à la source des engrais lors de leur production, autour des bâtiments d'élevage et lors des épandages aux champs.

La pollution par les nitrates dans les écosystèmes aquatiques perturbe les équilibres chimiques et biologiques des sols et favorise l'eutrophisation. Les pesticides affectent aussi les processus pédologiques, réduisent jusqu'à 40 % la richesse en macro invertébrés des rivières, et affectent la biodiversité, y compris les pollinisateurs, pourtant indispensables aux cultures.

Les métaux lourds provenant des déchets électroniques, de l'exploitation minière ou industrielle migrent vers les écosystèmes par ruissellement et accumulation dans la chaîne alimentaire chez les espèces aquatiques. Ces polluants affectent à la fois le fonctionnement des écosystèmes et la santé humaine.

***Chapitre 2 :
Pollution
industrielle – Cas
des cimenteries***

Chapitre 2 : Pollution industrielle – Cas des cimenteries

Le développement industriel constitue un pilier essentiel de la croissance économique, mais il s'accompagne souvent d'une augmentation des pressions sur l'environnement (UNEP, 2019).

Parmi les secteurs les plus impactant figure l'industrie du ciment, en raison de l'importance de ses émissions atmosphériques et de sa forte consommation énergétique (IEA, 2018).

2.1. Le ciment

2.1.1. Définition

Le ciment désigne un liant hydraulique dont les propriétés lui permettent de développer, après mélange avec l'eau, une pâte capable de faire prise et de durcir durablement, aussi bien en présence de l'air que sous l'eau. Présenté sous forme pulvérulente, il est largement utilisé dans l'industrie de la construction pour l'élaboration des bétons et des mortiers (Deghamna et Boumellit, 2019).

D'un point de vue minéralogique, le ciment peut être défini comme un mélange d'oxyde basique, CaO noté C, et d'oxydes acides ou amphotères comme SiO_2 , noté S, Al_2O_3 noté A, ou Fe_2O_3 noté F, en notation cimentaire (Ouzid, 2017). D'un point de vue chimique, il s'agit d'un matériau artificiel obtenu par la cuisson d'un mélange de silice, d'alumine et de carbonate de calcium (de chaux), sur lesquels l'eau n'a aucune action (ou qu'une action particulièrement lente avant la trituration), et qui sont réduits en poudre mécaniquement (Kadri et al., 2017).



Figure3 : Poudre de ciment

2.1.2. Les principaux ingrédients du ciment

Le ciment Portland est fabriqué à partir d'un cru obtenu en mélangeant et en broyant du calcaire (80 %) et des minéraux riches en silice et en alumine (argile ou kaolin) (20 %). Ce mélange est ensuite calciné à 1450 C° pour obtenir le clinker qui sera finement broyé et mélangé à une source de sulfate (gypses ou anhydrites) et d'éventuels minéraux pour constituer le ciment (Kurdowski, 2013).



Figure4: Ingrédients du ciment

2.1.3. Etapes de fabrication

Le processus de fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

2.1.3.1. Extraction des matières premières

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert. Afin de garantir une qualité constante du produit final, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement stable dans le temps (Azzouz et Rezig, 2014).

Chapitre 2 : Pollution industrielle – Cas des cimenteries

Le calcaire et l'argile sont les principaux matériaux utilisés dans la fabrication du ciment. Le minerai calcaire peut être du carbonate de calcium (CaCO_3), de la dolomite ($\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$ ou $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), ou Dioxyde de calcium et de magnésium (CaO.MgO).

Quant à l'argile, elle peut se présenter sous les formes suivantes :

- ✓ Kaolinite : $\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.(\text{OH})_4$;
- ✓ Halloysite : $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5).(\text{OH})_4$;
- ✓ Montmorillonite : $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$;
- ✓ Illite ou Phyllosilicates : $\text{K}_{0,65}\text{Al}_2(\text{Al}_{0,65}\text{Si}_{3,35}\text{O}_{10})\text{OH}$;
- ✓ Chlorites : $\text{Mg}_5(\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_8(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}$;
- ✓ Sépiolite : $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_{22}.2\text{H}_2\text{O}$. (Mungyeko Bisulandu et Marias, 2019)

D'autres matières sont nécessaires pour la fabrication du ciment tel que le sable, le minerai de fer et le gypse. Mais, contrairement au calcaire et l'argile, elles sont achetées (Mebarki, 2013).

2. 1.3.2. Concassage

L'opération de concassage a pour objectif, la réduction des blocs de pierres en fragments de faibles granulométrie (environ 25 mm), cette opération est assurée par un concasseur à marteaux ce sont les plus utilisés en cimenterie (Dahri, 2019).

2.1.3.3. Pré-homogénéisation

Les matières extraites des carrières puis concassées, sont disposées en couches horizontales successives, qui finissent par former un tas, dont la composition globale est celle désirée. Les couches sont ensuite reprises verticalement, ce qui permet de prélever en permanence une matière de composition identique. La matière crue est reprise dans les tas de pré-homogénéisation par des roues pelles la pré-homogénéisation de la matière première se fait à l'aide d'un bras râteau, tournant autour d'un axe dans un hall (Djebbari, 2020).

2.1.3.4. Dosage et broyage du cru

Les produits extraits sont acheminés par des tapis roulants vers les doseurs de calcaire et d'argile pour ajuster les proportions de calcaire et d'argile. La composition moyenne utilisée est de 80 % de calcaire et 20 % d'argile. Le mélange obtenu est ensuite envoyé au moulin, afin

d'obtenir un mélange homogène appelé cru ou « farine » sous forme de poudre très fine (diamètre inférieur à 200 microns) ayant une composition fixe.

La composition du cru reste généralement dans les proportions suivantes :

Tableau2 ; Composition générale du cru. (Mungyeko Bisulandu et Marias, 2019)

Composant du cru	Proportion
Carbonate de calcium (CaCO_3)	77 à 83 %
Silice (SiO_2)	13 à 14%
Alumine (Al_2O_3)	2 à 4%
Oxyde de fer (Fe_2O_3)	1,5 à 3 %.

2.1.3.5. Cuisson de la farine et création du clinker

Une fois le cru préparé, il sera acheminé directement à l'entrée du four, qui est souvent constitué d'un grand cylindre d'environ 3 à 6m de diamètre et de 50 à 150m de longueur, incliné par rapport à l'horizontale de 3 à 5% de façon à permettre une descente progressive des matières en rotation autour de son axe. La partie inférieure du four est équipée d'une flamme entretenant une température de l'ordre de 1450°C ; en s'approchant de cette zone, le cru subi des transformations successives qui le conduisent au produit fini qui est **le clinker** (Djebbari, 2020).

2.1.3.6. Refroidissement

A la sortie du four, le clinker est introduit dans un refroidisseur à ballonnets ou à grilles où il est refroidi jusqu'à une température de 120 °C. Le rôle des refroidisseurs consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention jusqu'aux silos de stockage (Akacha, 2020).

2.1.3.7. Stockage du clinker

Après refroidissement, le clinker se présente sous la forme de grosses pierres et est dirigé vers le silo par tapis métallique pour le stockée (Ziat, 2020).

2.1.3.8. Broyage du clinker

Le clinker additionné de gypse (retardateur de prise) et éventuellement d'ajouts (calcaire, pouzzolane ...) sont broyés de manière à obtenir des particules de taille plus fines. Les modes de broyage utilisés en cimenterie sont adaptés au caractère dur, et abrasif du clinker (Ziat, 2020).

2.1.3.9. Stockage du ciment

Après le broyage de clinker, gypse et ajout est dirigé le produit fini vers le silo de stockage.

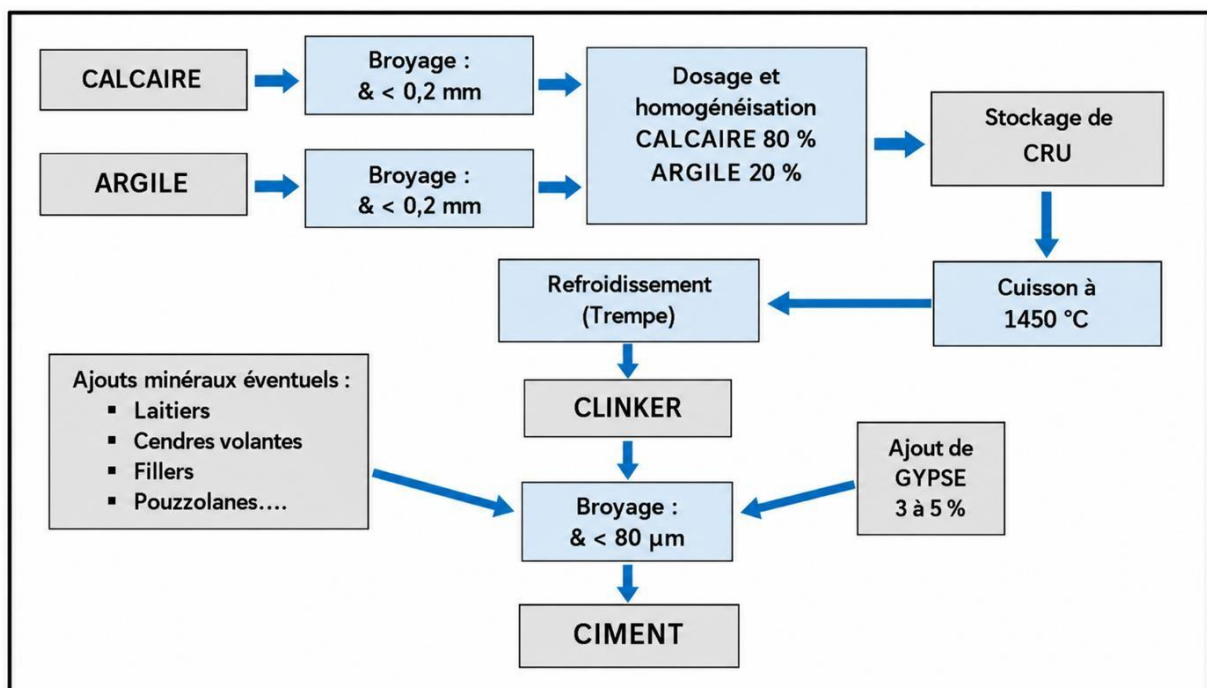


Figure 5 :Procédé de fabrication du ciment.

2.2. Sous-produits de la fabrication du ciment

Dans l'industrie du ciment, les principaux rejets vers l'atmosphère sont constitués essentiellement par les gaz de combustion au niveau des fours de cuisson, mais surtout par les émissions de poussières à tous les niveaux de la production du ciment. Le processus de production du clinker qui précède la fabrication du ciment est le processus le plus important dans l'industrie du ciment mais c'est aussi le processus qui produit le plus d'émissions polluantes. Les émissions des fours sont donc responsables des principaux rejets polluants dans l'atmosphère lors du chauffage du calcaire à très haute température (Zouai, 2011).

2.3. Sources de pollution dans les cimenteries

L'industrie cimentière constitue l'une des principales sources de pollution environnementale. Les différentes étapes du procédé de fabrication du ciment sont fortement génératrices de poussières et nécessitent une consommation énergétique importante. Ces activités entraînent l'émission de volumes élevés de divers polluants environnementaux à des concentrations significatives. Des particules de poussières de tailles variées ainsi que des substances volatiles, composées principalement d'éléments alcalins et toxiques, sont rejetées dans l'environnement. Ces émissions comprennent notamment des éléments traces, des métaux lourds, des matières particulaires, des polluants gazeux et des composés organiques volatils (Ayobami et al., 2023).

2.3.1. Émissions de poussières

Les industries de ciment génèrent des rejets atmosphériques importants sous forme de poussières, notamment à partir des cheminées équipées d'électrofiltres et des carrières d'extraction. L'analyse chimique de ces poussières (par spectrophotomètre à rayon X - QCX) montre une prédominance majeure de carbonate de calcium (CaCO_3) dépassant 80%, accompagnée de teneurs notables en silice (SiO_2), et de faibles proportions d'autres oxydes (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , SO_2 et Cl). Sous l'effet des facteurs climatiques tels que la direction des vents, ces particules retombent au sol et s'infiltrant à travers les couches superficielles, provoquant une altération physico-chimique directe et une minéralisation excessive des eaux souterraines environnantes (Hamiri et al., 2011).

2.3.2 Émissions gazeuses

La production de ciment constitue l'une des sources les plus importantes de pollution atmosphérique, principalement en raison des émissions de poussières cimentaires et de gaz toxiques, notamment les oxydes de soufre. Ces gaz sont émis à des concentrations élevées en raison de la combustion du soufre contenu dans les combustibles et les matières premières, contribuant ainsi à la formation du smog ainsi qu'aux émissions de dioxyde de carbone générées lors du processus de transformation du clinker à haute température. Par ailleurs, des oxydes d'azote sont également libérés au cours des opérations de broyage et de cuisson du clinker dans les fours, ainsi que durant les phases de refroidissement (Dahdouh et al., 2025).

Environ 5 % des émissions mondiales de carbone sont imputables à la fabrication du ciment. On estime que la production d'une seule tonne de clinker de ciment peut générer 46,7 g de poussières, 1,80 kg de NO_x sous forme de NO₂, 0,504 kg de (SO₂), 52,4 g de COV sous forme de C, 9,8 g d'acide chlorhydrique (HCl) et 0,7 g d'acide fluorhydrique (HF) (Al-Zboon et al., 2021).

2.3.4. Impact sur les sols

Le sol constitue une composante essentielle de l'environnement. Il reçoit des polluants provenant de diverses sources et sert également de milieu de vie pour les plantes ainsi que pour les interactions entre les organismes biologiques. Parmi les contaminants qui y sont déposés figurent des substances toxiques et non biodégradables, notamment les métaux lourds issus des procédés de fabrication du ciment. Une fois introduits dans le sol, ces métaux subissent différentes transformations chimiques susceptibles d'entraîner une alcalinisation du milieu et une modification des propriétés physicochimiques du sol et des végétaux. Les paramètres affectés comprennent notamment la teneur en substances toxiques, le pH, les concentrations en potassium, calcium et magnésium, la texture du sol, la matière organique, la conductivité électrique ainsi que le carbone organique du sol (Ayobami et al., 2023).

Les métaux lourds peuvent s'accumuler dans les plantes soit par absorption directe à partir de l'atmosphère, soit indirectement par l'absorption racinaire à partir du sol contaminé (Emetere et Dania, 2019). La répartition et le taux d'accumulation de ces éléments varient selon les espèces végétales (Souri et al., 2019).

Ainsi, la consommation de végétaux contaminés par les métaux lourds est associée à divers risques sanitaires. Elle a notamment été impliquée dans l'altération du fonctionnement du système immunitaire, la survenue de troubles de la fertilité ainsi que l'augmentation de l'incidence de certains cancers gastriques. Dans ce contexte, l'évaluation de la contamination métallique des écosystèmes ainsi que la mise en œuvre de stratégies de remédiation apparaissent indispensables pour préserver leur durabilité et réduire les risques environnementaux et sanitaires (Ayobami et al., 2023).

2.3.5. Impact sur les ressources en eau

L'eau est utilisée à plusieurs étapes du processus de production du ciment. Elle est utilisée directement pour le lavage des matières premières avant leur traitement et pour faciliter leur broyage. Diverses particules (par exemple, la chaux, les oxydes d'aluminium et le fer) sont lavées, ce qui entraîne une contamination de l'eau. L'utilisation indirecte concerne le refroidissement des paliers du four, des équipements de broyage, des canalisations thermiques, des compresseurs, etc.

Plusieurs études ont examiné les effets des eaux usées issues de la fabrication du ciment sur la qualité de l'eau des cours d'eau qui reçoivent ces effluents et ont démontré que les plans d'eau peuvent être contaminés par des substances dangereuses provenant des usines de fabrication de ciment (Barbulescu et Hosen, 2025)

2.3.6. L'impact de la pollution sur la biodiversité

Les poussières de ciment exercent un impact négatif sur l'équilibre environnemental et génèrent des gaz polluants susceptibles d'altérer divers types de végétation. Dans les zones urbaines, l'implantation d'une cimenterie engendre plusieurs nuisances affectant aussi bien la qualité de l'air que l'interface sol-plante (Bayouli et al., 2021).

L'une des principales préoccupations concerne la contamination des sols résultant des émissions des cimenteries. En effet, un large éventail de polluants est produit, principalement sous forme d'émissions gazeuses telles que le dioxyde d'azote (NO_2), le dioxyde de soufre (SO_2) et le dioxyde de carbone (CO_2). Par ailleurs, des métaux lourds et des métalloïdes (Hg, Cd, Zn, Cu, Fe et As), ainsi que des particules fines de diamètre inférieur ou égal à 10 μm (PM_{10}), ont été identifiés parmi les sous-produits de la fabrication du ciment (Hua et al., 2016).

Les polluants émis par les sources industrielles sont rejetés dans l'atmosphère puis se déposent sur les écosystèmes terrestres, notamment sur le sol et le couvert végétal. En conséquence, les sols contaminés interfèrent avec différents processus écologiques, les cycles biogéochimiques, la régulation et la filtration de l'eau, ainsi qu'avec d'autres polluants déposés susceptibles d'être lessivés dans les substrats. Il en résulte une perturbation

Chapitre 2 : Pollution industrielle – Cas des cimenteries

progressive du fonctionnement des écosystèmes contaminés, conduisant à un déséquilibre des interactions naturelles entre le sol et la végétation (Belone et al., 2012).

A stylized graphic of a scroll. It features a horizontal bar at the top with a rounded right end and a small, shaded, teardrop-shaped tab on the left. A vertical line descends from the left end of this bar, forming the left edge of a large rectangular frame. The bottom-left corner of this frame is rounded and contains a shaded, teardrop-shaped tab. The text is centered within this frame.

Deuxième partie
Partie
experimentale

Chapitre III
Matériel &
Méthodes

Chapitre III. Matériel & Méthodes

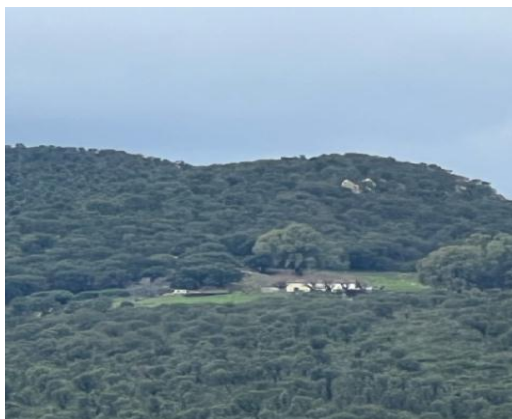
3.1. Présentation de la zone d'étude et des stations d'échantillonnage

L'étude a été menée afin d'évaluer l'impact des rejets de la société des ciments [CENTRALE À BÉTON BP PROMO] sur la qualité physico-chimique des sols et des eaux avoisinantes, ainsi que sur la biodiversité végétale locale. Pour ce faire, un protocole d'étude comparative a été mis en place entre deux stations contrastées :

1. La station industrielle (Zone Cimenterie) : Située à proximité immédiate du complexe cimentier dans la commune d'Aïn-Assel (La wilaya d'El Tarf). Cette zone est potentiellement soumise aux retombées atmosphériques et aux rejets de l'activité industrielle.



2. La station témoin (Zone naturelle) : Située dans une zone préservée, exempte de pollution industrielle apparente. Sur le plan géographique, cette station est distante de la cimenterie d'environ 4 km à vol d'oiseau (en traversant la montagne) et de 8 km par le réseau routier.



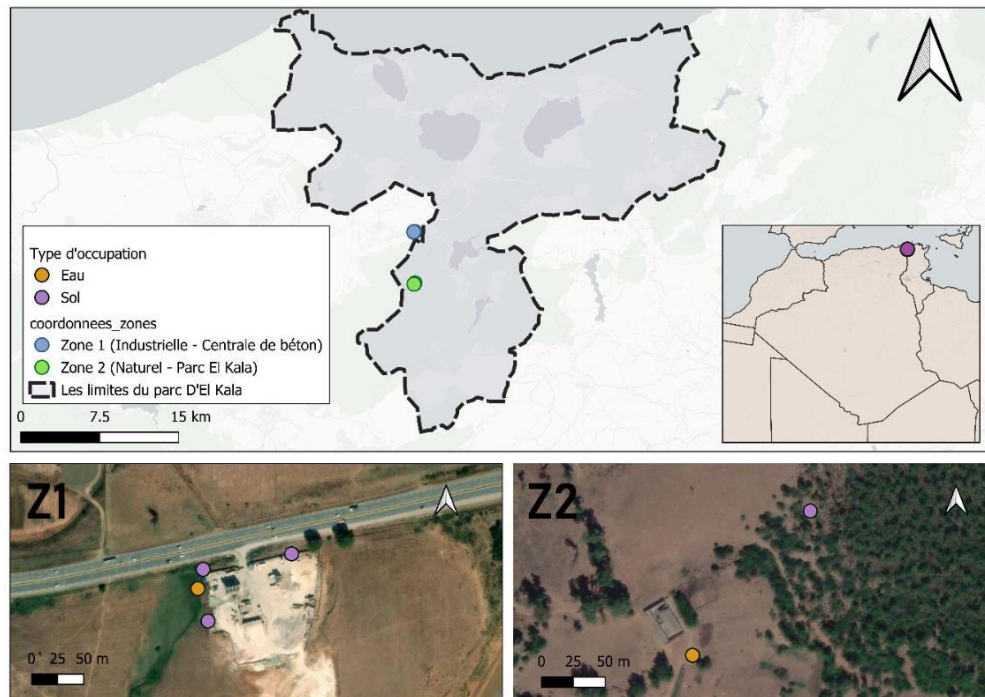


Figure 6 : Localisation de la cimenterie [CENTRALE À BÉTON BP PROMO] (Commune de Aïn Assel, Wilaya d'El Tarf) et positionnement des sites de prélèvement du sol.

3.2. Caractéristiques naturelles et conditions climatiques

3.2.1. Relief et morphologie : Le territoire de la wilaya est partagé en 03 parties :

- Une bande littorale qui s'étend sur 90 km de l'Ouest vers les frontières tunisiennes ; elle englobe 05 communes ;
- Une plaine dont l'altitude n'excède pas 100m et qui souffre notamment de problèmes d'inondations saisonnières et de drainage des eaux pluviales ;
- Une zone forestière et montagneuse au sud ; elle s'étend sur 1660 km², soit 57% de la superficie globale de la wilaya.

Cette variété dans les caractéristiques naturelles de la wilaya lui confère trois vocations : agricole, forestière et touristique.

3.2.2. L'étude climatique

Le climat de la wilaya est de type méditerranéen, caractérisé par 02 grandes périodes : Une saison pluvieuse d'octobre à avril et une saison sèche de mai à septembre.

La température moyenne annuelle est d'environ 18°C. Les mois les plus chauds sont juillet et août, avec une température moyenne d'environ 25°C, tandis que les mois les plus froids sont décembre et janvier, avec des températures moyennes d'environ 12°C. La zone d'étude bénéficie d'un climat subhumide, avec des hivers tempérés à chaud (Emberger, 1955). Il y a une généreuse pluviométrie, avec un total annuel de précipitations variant entre 710 et 910 mm. Pendant l'été, les vents chauds et secs dominant, ce qui assèche l'atmosphère et contribue aux incendies de forêt. Heureusement, la région bénéficie également de fortes précipitations, ce qui permet de maintenir la végétation et les cours d'eau importants. Les grands lacs comme El Mellah, Oubeïra et Tonga, ainsi que les nombreuses rivières et sources, contribuent à la richesse hydrographique de la zone.

3.2.2.1. Caractéristiques climatiques

Le Parc National d'El Kala est caractérisé par un important complexe humide et un réseau hydrologique dense constitué par des Oueds dont les plus importants sont : Oued El Kebir, Oued El Hout, Oued Bougous, Oued Ballouta, Oued Bouaroug, et les lacs dont certains sont d'une importance internationale telle que le lac Tonga (2700 ha), Oubeïra (2200 ha) et El Mellah (800 ha). Quant aux sources, elles sont nombreuses et réparties à travers tout le parc. Les sources de Bouglez, Bourdim et El-Bhaim comptent parmi les plus connues. Le climat de zone est de type méditerranéen (Emberger, 1971).

A/ Température : la température est en général influencée par l'altitude, l'exposition, l'orientation du relief, l'éloignement de la mer, la réverbération au sol ainsi que par le couvert végétal. La région se caractérise par des amplitudes thermiques élevées entre les extrêmes les plus froides « m » = 14,6°C et les plus chaudes « M » = 22,6°C (CHABI, 1998). D'une manière générale, la température situe El Kala dans le méditerranéen chaud avec une amplitude thermique élevée entre les extrêmes les plus froides et les plus chaudes. Les températures les plus basses sont enregistrées en altitude durant l'hiver au Djebel Ghora, avec environ 5 à 6 mois de gelée blanche par an. Au niveau de la mer, les températures descendent très rarement à 0°C. Les mois les plus froids sont janvier et février, alors que août reste le mois le plus chaud (31,4°C). Les variations des températures moyennes relatives de la décennie allant de 2002 à 2012 sont illustrées par la figure 7

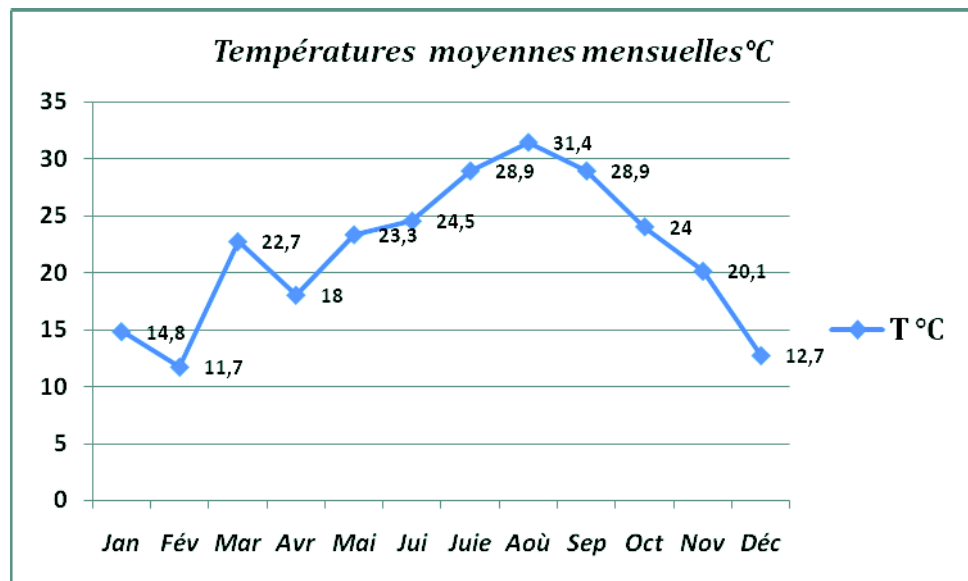


Figure7 : Température moyenne mensuelle (2002-2012) ; Source: Station météorologique d'El Kala.

B/ Précipitations : Le climat de la région est caractérisé par trois types de précipitations. Nous avons d'une part un régime pluviométrique du type méditerranéen, avec une saison pluvieuse où le bilan hydrique est conséquent et significatif en hiver et au printemps. Une saison sèche avec un bilan hydrique limité au cours de la période du mois de mai à octobre. D'autre part, la neige apparaît sur les sommets dépassant les 700 m d'altitude en janvier et février. Sur la base des données recueillies, depuis 1913, les précipitations diminuent régulièrement, les moyennes mensuelles sont passées de 910 mm par an entre 1913 et 1935 (SELTZER, 1946 in BOUMEZBEUR, 1993), à 768,3 mm entre

1950 et 1988 (Chalabi, 1990), la pluviométrie moyenne annuelle enregistrée entre 1986 et 1992 s'est limitée à 672,4 mm. Pour la période comprise entre 1986-2006 les moyennes mensuelles ont beaucoup chuté jusqu'à atteindre 61,44 mm seulement, soit un déficit de 848,56 mm, 706,86 mm et 610 mm respectivement par rapport aux trois périodes précédentes (1913- 1935, 1950-1988, 1986- 1992).

Les variations mensuelles des précipitations de la période 2002 à 2012 sont illustrées par la figure 8. La région d'EL KALA compte parmi les zones les plus arrosées d'Afrique du Nord (1300 mm/an) (Benyacoub *et al.*, 1998). D'après la figure ci-dessous, le mois le plus arrosé est décembre avec 121,39 mm et le mois le moins arrosé est juillet avec 2,52 mm.

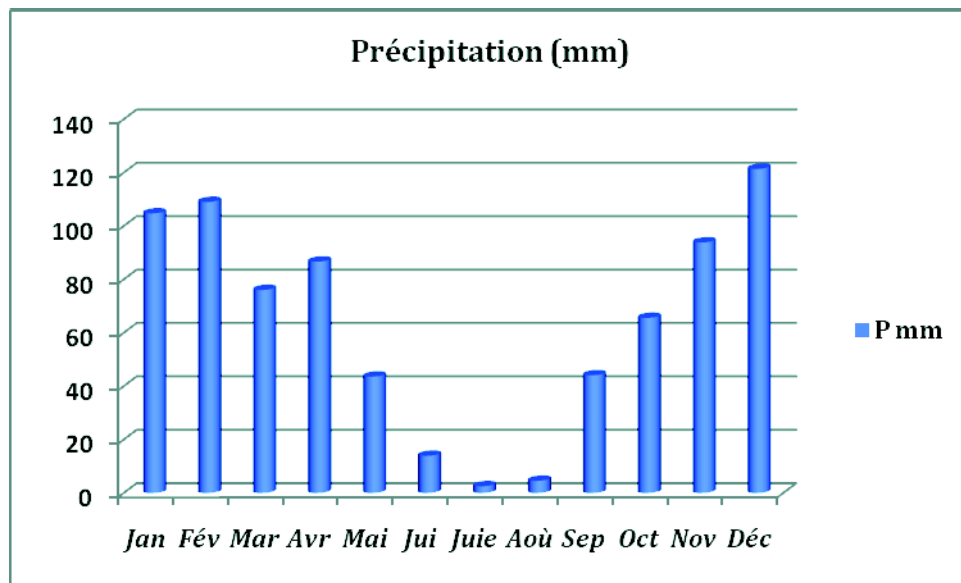


Figure8 : Précipitation moyenne mensuelle (2002-2012) ; (Source: barrage El Chafia)

C/ Humidité : La proximité de la mer et des étendues de zones humides favorisent la nébulosité dans la région. La mer joue un rôle de condensateur des masses d'air tropical, tandis que les zones humides subissent une évaporation intense du fait de l'ensoleillement. Il en résulte une humidité atmosphérique élevée qui se transforme au début du printemps, en brumes qui recouvrent souvent les hauteurs de Djbel Ghorra ainsi que les vallées basses et les zones humides donc l'humidité relative de l'air est assez constante durant toute l'année et dépasse 70% (Semadi, 1989).

D/ Vents : Les vents de la région sont de régime Nord-Ouest durant la saison hivernale et une partie de la saison estivale. Ils accompagnent durant cette période, les dépressions atlantiques qui amènent les pluies d'automne, d'hiver et de printemps. A partir du mois de mai, les vents s'orientent le plus souvent du sud-ouest au sud-est. Ils accompagnent alors des dépressions sahariennes et deviennent particulièrement chauds. Ces derniers ont des conséquences néfastes sur la diversité biologique dans la mesure où ils provoquent un réchauffement de l'atmosphère et facilitent les départs d'incendies.

3.2.3. Diversité biologique de la région

Le Parc National d'El Kala est constitué d'une mosaïque d'écosystèmes marins, lacustres, dunaire et forestiers. Cette diversité écologique lui confère une valeur patrimoniale élevée tant au point de vue biodiversité que du point de vue agronomique (Oulmouhoub & Laboudi, 1999).

3.2.3.1. Richesse floristique

Les études conduites par (Debelair, 1990), mentionnent 550 espèces de Spermaphytes, 300 Cryptophytes dont 25 fougères, 110 champignons, 40 mousses, 70 algues et 50 lichens.

Les espèces typiquement méditerranéennes constituent la trame de fond de la flore de la région d'El Kala. Cette diversité a permis le développement d'une multitude de formations végétales dont certaines constituent un patrimoine à préserver et protéger pour leur rareté, leur fragilité, leur originalité, leur diversité. La zénaie d'altitude, les subéraies, des aulnaies, des ripisylves et de la cocciféraie du cordon dunaire en sont des exemples.

3.2.3.2. Richesse faunistique

Parmi les groupes systématiques rencontrés au sein du Parc, les oiseaux qui constituent une richesse faunistique la plus spectaculaire avec 191 espèces d'oiseaux (Benyacoub & Chabi, 2000). Ce chiffre constitue environ 47% du nombre total d'espèces aviaires que compte le pays (Moali, 1998). Selon (Rouag, 1999) il existe 23 espèces de Reptiles et d'Amphibiens, et selon Benyacoub *et al.*, (1998), note que la faune mammalienne du Parc compte 37 espèces dont les plus abondantes sont : le Sanglier, le Chacal, la Mangouste, et le Cerf de Barbarie qui est le mammifère le plus précieux de la région (Alleg, 1986).

Parmi l'entomofaune répertoriée dans cette biosphère il existe 40 espèces d'Odonates (Menai, 1993), 50 espèces de Syrphidés (Djellab, 1993), 45 espèces de Carabidés, 31 espèces du Rhopalocères (Benyacoub, 1998).

3.3. Stratégie d'échantillonnage et prélèvement des milieux

La campagne de prélèvement s'est déroulée durant la période printanière (mois de mars et avril), saison propice à l'évaluation de la dynamique des nutriments et à l'inventaire floristique.

3.3.1. Prélèvement des échantillons de sol

L'échantillonnage a été ciblé sur la couche superficielle du sol (**0 à 20 cm**), là où se concentrent généralement les dépôts de polluants atmosphériques et la majorité des racines des plantes herbacées.

- **Volume d'échantillonnage** : Afin de garantir la fiabilité et la représentativité statistique des analyses, trois (03) prélèvements distincts (répétitions) ont été effectués de manière aléatoire au niveau de chacune des deux stations (soit un total de 6 échantillons de sol).
- **Conditionnement** : Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une pelle à main, puis stockés dans des sacs en papier propres et hermétiquement fermés. Chaque échantillon a été étiqueté avec sa date, ses coordonnées GPS précises et ses caractéristiques topographiques avant d'être transporté au laboratoire.



3.3.2. Prélèvement des échantillons d'eau

Les ressources hydriques de surface ou souterraines situées à proximité des deux stations ont également été échantillonnées.

- **Volume d'échantillonnage** : Deux (02) prélèvements d'eau ont été standardisés pour chaque station (soit un total de 4 échantillons d'eau, une bouteille chacune).
- **Conditionnement** : Les échantillons ont été collectés dans des flacons en polyéthylène préalablement rincés avec l'eau du site, conservés à basse température et à l'obscurité, puis acheminés immédiatement au laboratoire pour les analyses à court terme.



3.4. Méthodes de travail : analyses au laboratoire

3.4.1. Analyses physico-chimiques et métalliques des matrices

Les mêmes paramètres analytiques ont été appliqués systématiquement aux échantillons d'eau et de sol provenant des deux stations (industrielle et témoin). Les paramètres physico-chimiques généraux analysés au cours de cette étude sont :

- **Potentiel Hydrogène (pH) :** Mesuré par méthode électrométrique à l'aide d'un pH-mètre de laboratoire calibré. Pour le sol, la mesure s'effectue sur une suspension de terre (rapport sol/eau de 1/2,5).
- **Conductivité Électrique (CE) et Salinité :** Déterminées à l'aide d'un conductimètre afin d'évaluer la concentration globale en sels dissous. La salinité est directement déduite de la conductivité.
- **Humidité (Teneur en eau) :** Déterminée par méthode gravimétrique par pesée avant et après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures jusqu'à obtention d'une masse constante.
- **Matière Organique (MO) :** Évaluée principalement sur la matrice sol [et l'eau si applicable] par la méthode de calcination au four à moufle à 550°C ou par la méthode d'oxydation par voie humide (Méthode de Walkley-Black).
- **Turbidité :** Spécifiquement mesurée sur la matrice eau à l'aide d'un turbidimètre de type Néphélométrique pour quantifier le degré de turbidité provoqué par les matières en suspension.

3.4.1.1. Caractérisation physico-chimique des sols et des eaux

- **Potentiel Hydrogène (pH)**

* *Pour le sol :* Le pH-eau a été déterminé par méthode électrométrique sur une suspension de sol (rapport sol/eau de 1/2,5) selon le protocole de référence (*Roddier*). Une prise d'essai de 20g de terre fine a été mélangée à 50 mL d'eau distillée. Après une agitation mécanique de 30 minutes et un repos d'une heure, la lecture a été effectuée à l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné.

* *Pour l'eau :* Le pH a été mesuré directement sur l'échantillon d'eau brute filtrée, par immersion de l'électrode du pH-mètre selon la méthode de *Roddier*.

- **Conductivité Électrique (CE) et Salinité**

* *Pour le sol* : La CE (exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$) a été mesurée sur un extrait aqueux au rapport 1/5 (Roddi^{er}). Une masse de 20 g de sol sec a été agitée dans 100 mL d'eau distillée pendant 30 minutes. Après filtration, la mesure a été effectuée sur le filtrat à l'aide d'un conductimètre thermique régulé.

* *Pour l'eau* : La CE a été mesurée directement sur l'échantillon d'eau liquide à l'aide de la cellule de conductivité du conductimètre.

- **Humidité (Teneur en eau)** : Évaluée par méthode gravimétrique. Le sol frais a été pesé, puis séché à l'étuve à 05°C pendant 24 heures jusqu'à l'obtention d'une masse sèche constante. La perte de masse permet de calculer le pourcentage d'humidité.
- **Matière Organique du sol (MO)** : Le dosage du carbone organique a été réalisé selon la **méthode d'ANNE**. Le principe repose sur une oxydation par voie humide du carbone du sol à l'aide d'un excès de bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en milieu fortement acide (acide sulfurique, H_2SO_4). L'excès de bichromate n'ayant pas réagi avec la matière organique est ensuite titré en retour par une solution de sel de Mohr, en présence d'un indicateur coloré (la diphénylamine). Le taux de matière organique (%) est déduit du carbone organique dosé.
- **Turbidité de l'eau** : Ce paramètre a été évalué à l'aide d'un turbidimètre de laboratoire. La mesure repose sur l'intensité lumineuse diffusée par les matières en suspension présentes dans l'échantillon d'eau, exprimée en Unités de Turbidité Néphélométriques (NTU).

3.4.2. Protocoles d'extraction des métaux lourds dans le sol

La quantification des quatre métaux lourds a été réalisée par **spectrophotométrie d'absorption moléculaire (UV-Visible)** sur les extraits de sol et les échantillons d'eau préalablement préparés.

Pour le milieu sol, deux techniques de mise en solution distinctes ont été appliquées selon la nature des éléments chimiques ciblés :

3.4.2.1. Extraction du Fer (Fe) et du Chrome (Cr) : Elle a été réalisée par complexation chélatante à l'aide d'une solution mixte d'**acétate d'ammonium en présence d'EDTA** au

Chapitre III. Matériel & Méthodes

rapport 1/10 (5 g de sol sec pour 50 mL de solution d'extraction à pH = 7). Après agitation vigoureuse et centrifugation à 2000 tr/min pendant 10 minutes, le surnageant a été filtré pour obtenir l'extrait translucide prêt au dosage.

Le Fer (Fe)

- **Principe** : Les ions ferreux Fe^{2+} réagissent en solution avec un dérivé de la triazine pour développer une coloration violette intense. Les ions ferriques Fe^{3+} initialement présents sont préalablement réduits en fer ferreux au cours de la réaction pour permettre le dosage du fer total.
- **Méthode** : Spectrophotométrie, méthode à la triazine.

Le Chrome (Cr)

- **Principe** : En milieu acide, les ions chromates réagissent de manière spécifique avec le diphénylcarbazide pour former un complexe de coordination soluble de couleur rouge-violet.
- **Méthode** : Spectrophotométrie, selon la norme **DIN EN ISO 7393 G4-2**.

3.4.2.2. Extraction du Plomb (Pb) et du Cadmium (Cd) : Ces deux éléments ont été extraits de la matrice solide par une méthode d'**attaque acide** (digestion acide forte), permettant de libérer les fractions métalliques liées aux minéraux du sol avant l'analyse.

Le Plomb (Pb)

Principe : En milieu tamponné à un pH compris entre 7 et 9 et en présence de cyanure (pour masquer les interférences d'autres métaux), les ions plomb (Pb^{2+}) forment avec la dithizone un complexe appelé dithizonate de plomb primaire. Ce complexe est extrait à l'aide d'un solvant organique (le tétrachlorure de carbone ou tétrachlorométhane), développant une coloration rose-rouge très sensible. L'absorbance du complexe coloré est mesurée par spectrophotométrie pour quantifier la concentration en plomb, exprimée en **milligrammes par kilogramme (mg/kg)** pour la matrice sol et en **milligrammes par litre (mg/l)** pour la matrice eau.

- **Méthode** : Spectrophotométrie, méthode à la dithizone.

Le Cadmium (Cd)

- **Principe :** À un {pH} > 6 les ions cadmium réagissent avec la dithizone pour former un dithizonate de cadmium primaire. Ce complexe coloré présente la particularité d'être stable en milieu fortement alcalin (hautement basique). Après extraction par le tétrachlorure de carbone, il développe une coloration rose-rouge très sensible permettant sa quantification.
- **Méthode :** Spectrophotométrie, méthode à la dithizone.

Pour chacun de ces quatre éléments, la concentration de l'échantillon (ou de l'extrait de sol) a été déterminée en mesurant l'absorbance à la longueur d'onde maximale du complexe coloré, par interpolation graphique sur une courbe d'étalonnage externe préalablement établie avec des solutions étalons de concentrations croissantes. Un témoin à blanc analytique a été systématiquement préparé pour chaque série de mesures.

3.4.3. Étude de la biodiversité végétale (Approche comparative)

Parallèlement aux caractérisations chimiques, une étude écologique comparative de la flore a été conduite entre la zone industrielle (impactée potentiellement par les poussières de cimenterie) et la zone témoin (espace naturel vert).

L'objectif est d'évaluer l'impact de l'activité cimentière sur la structure et la diversité des communautés végétales. La méthodologie repose sur :

3.4.3.1. La méthode des inventaires floristiques : Réalisation de relevés de végétation par la méthode du "Minimum de surface" (aire minimale) au niveau des stations de prélèvement du sol.

3.4.3.2. Identification taxonomique : Recensement exhaustif de toutes les espèces de plantes présentes et identification systématique à l'aide des flores de référence de la région.

3.4.3.3. Calcul des indices écologiques : Pour comparer la structure des deux groupements végétaux, les paramètres suivants seront calculés :

- La **Richesse spécifique (S)** : Nombre total d'espèces présentes.
- L'**Abondance-Dominance** : Estimée selon l'échelle classique de Braun-Blanquet.

3.5. Analyses statistiques

L'ensemble des données physico-chimiques, des concentrations en métaux (Fe, Cr, Cd et Pb) ainsi que les descripteurs floristiques ont été soumis à un traitement statistique descriptif (moyennes, écarts-types) et graphique sous le logiciel **Microsoft Excel 2016** afin de valider et de cartographier les variations significatives existant entre la station industrielle et la station naturelle.

Chapitre IV
Résultats &
Discussion

Chapitre IV. Résultats & Discussion

4.1. Caractérisation physico-chimique des matrices (Sol et Eau)

Les analyses physico-chimiques réalisées sur les échantillons solides (sols) et liquides (eaux) au niveau des deux stations d'étude (Station Témoin / Zone Naturelle et Station N°2 / Zone Cimenterie) ont mis en évidence des variations contrastées pour l'ensemble des paramètres suivis.

4.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des échantillons de Sol

Les résultats des analyses physico-chimiques du sol superficiel (0-20 cm) sont consignés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques physico-chimiques des échantillons de sol des deux stations.

Paramètres	Échantillon Sol Témoin	Échantillon Sol N°2
pH (à 25 °C)	6,86	7,62
CE (µS/cm à 20 °C)	102	295
Salinité (mg/l à 20 °C)	52	148
Matière Organique (MO %)	0,81	0,49
Humidité (%)	14,15	11,17

Les données du Tableau 3 indiquent que le sol témoin présente un pH proche de la neutralité (6,86) associé à une faible minéralisation (CE = 102 µS/cm). En revanche, le sol situé à proximité du complexe cimentier (Sol N°2) affiche un caractère alcalin net avec un pH de 7,62. Cette alcalinisation s'accompagne d'une augmentation notable de la conductivité électrique (295 µS/cm) et de la salinité de l'extrait aqueux (148 mg/l). Parallèlement, le taux de matière organique subit une baisse marquée au niveau de la station industrielle, s'effondrant à 0,49% contre 0,81% pour le témoin. De façon corrélative, l'humidité pondérale du sol diminue, passant de 14,15% (témoin) à 11,17% (Sol N°2).

Chapitre .IV: Résultats & Discussion

4.1.2. Caractéristiques physico-chimiques des échantillons d'Eau

Les résultats de la caractérisation hydrochimique et de la turbidité des eaux superficielles périphériques sont regroupés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques physico-chimiques des échantillons d'eau des deux stations.

Paramètres	Échantillon Eau Témoin	Échantillon Eau N°2
pH (à 25 °C)	6,50	7,42
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) à 20 °C)	152	653
Salinité (mg/l à 20°C)	152	327
Turbidité (FAU)	0,20	31,00

L'examen du Tableau 4 révèle une nette modification de la qualité de la matrice liquide entre les deux stations. L'Eau Témoin se caractérise par une faible minéralisation ($\text{CE}=152 \mu\text{S}/\text{cm}$) et une limpidité presque totale (Turbidité= 0,20 FAU). À l'inverse, l'Eau N°2 (zone industrielle) montre un basculement vers un pH basique (7,42) couplé à une forte augmentation de sa charge ionique, illustrée par une conductivité électrique multipliée par quatre ($653 \mu\text{S}/\text{cm}$) et une salinité de 327 mg/l. Le paramètre le plus impacté reste la turbidité, qui subit une augmentation massive pour atteindre la valeur hautement perturbée de 31 FAU au niveau de la station industrielle.

4.2. Évaluation quantitative des Métaux Lourds (Éléments Traces Métalliques)

Le dosage des éléments traces métalliques (Fer, Chrome, Plomb et Cadmium) a été effectué en trois essais pour la station industrielle (Sol N°2 et Eau N°2) afin d'assurer la reproductibilité des résultats.

4.2.1. Charge métallique de la matrice Sol

Les concentrations métalliques quantifiées dans le Sol N°2, exprimées en milligrammes par kilogramme de sol sec (mg/kg), sont présentées dans le Tableau 5.

Chapitre .IV: Résultats & Discussion

Tableau 5 : Teneurs en métaux lourds du sol de la station industrielle (Sol N°2).

Paramètres (mg/kg sec)	Moyenne $\pm$ Écart-type
Fer (Fe)	2326,00 $\pm$ 76,37
Chrome (Cr)	57,95 $\pm$ 0,64
Plomb (Pb)	39,75 $\pm$ 1,06
Cadmium (Cd)	32,75 $\pm$ 3,89

Les résultats du Tableau 5 mettent en évidence de fortes concentrations métalliques au sein de la zone industrielle. Le Fer affiche la teneur brute la plus élevée avec une moyenne de 2326,00 $\pm$ 76,37mg/kg. Les teneurs moyennes en Chrome et en Plomb s'établissent respectivement à 57,95 $\pm$ 0,64 mg/kg et 39,75 $\pm$ 1,06 mg/kg. Enfin, le Cadmium présente une concentration moyenne de 32,75 $\pm$ 3,89 mg/kg.

4.2.2. Charge métallique de la matrice Eau

Les concentrations en métaux lourds mesurées dans l'échantillon liquide industriel, exprimées en (mg/l), sont synthétisées dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Teneurs en métaux lourds de l'eau de la station industrielle (Eau N°2).

Paramètres (mg/l)	Moyenne $\pm$ Écart-type
Fer (Fe)	0,375 $\pm$ 0,049
Chrome (Cr)	0,795 $\pm$ 0,021
Plomb (Pb)	0,128 $\pm$ 0,007
Cadmium (Cd)	0,494 $\pm$ 0,023

Les analyses de la phase liquide (Tableau 6) révèlent la présence systématique des quatre métaux sous forme dissoute. Les concentrations moyennes se structurent ainsi : 0,375 $\pm$ 0,049mg/l pour le Fer, 0,795 $\pm$ 0,021mg/l pour le Chrome, 0,128 $\pm$ 0,007mg/l pour le Plomb et 0,494 $\pm$ 0,023mg/l pour le Cadmium.

Chapitre .IV: Résultats & Discussion

4.3. Analyse comparative de la Diversité Végétale

L'inventaire floristique printanier mené parallèlement sur les deux stations met en évidence une modification profonde de la composition et de l'abondance des espèces à proximité du complexe cimentier.

4.3.1. Inventaire de la Zone Naturelle (Station Témoin)

Au niveau de la station témoin, un cortège diversifié composé de 55 **taxons** a été recensé, reflétant un groupement végétal stable et structuré (Tableau 7).

Tableau 7 : Abondance et distribution des plantes au niveau de la station témoin (Zone Naturelle).

N°	Nom scientifique	Nom commun	Famille	Abondance
1	<i>Westringia fruticosa</i>	Romarin australien	Lamiaceae	+++
2	<i>Calicotome villosa</i>	Genêt épineux	Fabaceae	++
3	<i>Pistacia lentiscus</i>	Lentisque	Anacardiaceae	+++
4	<i>Arbutus unedo</i>	Arbousier	Ericaceae	++
5	<i>Melilotus officinalis</i>	Mélilot	Fabaceae	++
6	<i>Geranium robertianum</i>	Géranium herbe à Robert	Geraniaceae	+
7	<i>Borago officinalis</i>	Bourrache	Boraginaceae	++
8	<i>Glebionis coronaria</i>	Chrysanthème couronné	Asteraceae	+++
9	<i>Silybum marianum</i>	Chardon-Marie	Asteraceae	++
10	<i>Foeniculum vulgare</i>	Fenouil	Apiaceae	+
11	<i>Adiantum capillus-veneris</i>	Capillaire de Montpellier	Pteridaceae	+
12	<i>Taraxacum officinale</i>	Pissenlit	Asteraceae	+
13	<i>Prunus domestica</i>	Prunier	Rosaceae	+
14	<i>Washingtonia filifera</i>	Palmier	Arecaceae	+
15	<i>Sedum rubrotinctum</i>	Orpin	Crassulaceae	+
16	<i>Ficus carica</i>	Figuier	Moraceae	+
17	<i>Malva sylvestris</i>	Mauve	Malvaceae	+++
18	<i>Sinapis arvensis</i>	Moutarde sauvage	Brassicaceae	++
19	<i>Citrus sinensis</i>	Oranger	Rutaceae	+
20	<i>Quercus suber</i>	Chêne-liège	Fagaceae	+++
21	<i>Citrus aurantium</i>	Oranger amer	Rutaceae	+
22	<i>Olea europaea</i>	Olivier	Oleaceae	+++
23	<i>Punica granatum</i>	Grenadier	Lythraceae	+
24	<i>Phillyrea latifolia</i>	Filaire	Oleaceae	+++
25	<i>Oxalis pes-caprae</i>	Oxalis	Oxalidaceae	+++
26	<i>Erica multiflora</i>	Bruyère	Ericaceae	++
27	<i>Hypochaeris radicata</i>	Porcelle enracinée	Asteraceae	++
28	<i>Scolymus hispanicus</i>	Scolyme	Asteraceae	++
29	<i>Urtica dioica</i>	Ortie	Urticaceae	+++
30	<i>Beta vulgaris</i>	Betterave	Amaranthaceae	+
31	<i>Stellaria media</i>	Mouron des oiseaux	Caryophyllaceae	++
32	<i>Sonchus oleraceus</i>	Laiteron	Asteraceae	++

Chapitre .IV: Résultats & Discussion

33	<i>Chenopodium album</i>	Chénopode blanc	Amaranthaceae	++
34	<i>Morus alba</i>	Mûrier blanc	Moraceae	+
35	<i>Mentha spicata</i>	Menthe verte	Lamiaceae	+++
36	<i>Pelargonium graveolens</i>	Géranium rosat	Geraniaceae	+
37	<i>Aloysia citrodora</i>	Verveine citronnelle	Verbenaceae	+
38	<i>Trifolium repens</i>	Trèfle blanc	Fabaceae	+++
39	<i>Kalanchoe pinnata</i>	Kalanchoé	Crassulaceae	+
40	<i>Ranunculus repens</i>	Renoncule rampante	Ranunculaceae	++
41	<i>Bellis perennis</i>	Pâquerette	Asteraceae	+++
42	<i>Plantago major</i>	Plantain majeur	Plantaginaceae	++
43	<i>Geranium molle</i>	Géranium mou	Geraniaceae	++
44	<i>Euphorbia peplus</i>	Euphorbe	Euphorbiaceae	+
45	<i>Sherardia arvensis</i>	Sherardie	Rubiaceae	+
46	<i>Euphorbia characias</i>	Euphorbe characias	Euphorbiaceae	++
47	<i>Asphodelus microcarpus</i>	Asphodèle	Asphodelaceae	+++
48	<i>Eucalyptus</i>	Eucalyptus	Myrtaceae	+
49	<i>Anagallis arvens</i>	Mouron rouge	Primulaceae	++
50	<i>Lavandula stoechas</i>	Lavande stéchade	Lamiaceae	++
51	<i>Morus alba</i>	Mûrier blanc	Moraceae	+
52	<i>Matricaria chamomilla</i>	Camomille allemande	Asteraceae	++
53	<i>Alcea rosea</i>	Rose trémière	Malvaceae	++
54	<i>Ranunculus muricatus</i>	Renoncule épineuse	Ranunculaceae	++
55	<i>Geranium dissectum</i>	Géranium découpé	Geraniaceae	+++

Code d'abondance : +++ = forte, ++ = moyenne, + = faible

4.3.2. Inventaire de la Zone Industrielle (Station Cimenterie)

Au niveau du périmètre influencé par la cimenterie, la richesse spécifique chute de manière drastique pour n'atteindre que **22 taxons** recensés (Tableau 8).

Tableau 8 : Abondance et distribution des plantes au niveau de la station industrielle (Zone Cimenterie).

N°	Nom scientifique	Nom commun	Famille	Abondance
1	<i>Eucalyptus</i>	Eucalyptus	Myrtaceae	+
2	<i>Calicotome villosa</i>	Calicotome velue	Fabaceae	+
3	<i>Juncus acutus</i>	Jonc piquant	Juncaceae	+
4	<i>Typha latifolia</i>	Massette à larges feuilles	Typhaceae	+
5	<i>Ranunculus repens</i>	Renoncule rampante	Ranunculaceae	++
6	<i>Cardamine hirsuta</i>	Cardamine hirsute	Brassicaceae	++
7	<i>Salvia viridis</i>	Sauge verte	Lamiaceae	++
8	<i>Olea europaea</i>	Olivier	Oleaceae	+
9	<i>Plantago major</i>	Grand plantain	Plantaginaceae	+++
10	<i>Plantago lanceolata</i>	Plantain lancéolé	Plantaginaceae	+++
11	<i>Notobasis syriaca</i>	Chardon syriaque	Asteraceae	+++
12	<i>Glebionis coronaria</i>	Chrysanthème couronné	Asteraceae	+
13	<i>Silybum marianum</i>	Chardon-Marie	Asteraceae	+++
14	<i>Carthamus lanatus</i>	Carthame laineux	Asteraceae	++
15	<i>Mentha spicata</i>	Menthe verte	Lamiaceae	+

Chapitre .IV: Résultats & Discussion

16	<i>Echium plantagineum</i>	Vipérine faux-plantain	Boraginaceae	++
17	<i>Hypochaeris radicata</i>	Porcelle enracinée	Asteraceae	++
18	<i>Calendula arvensis</i>	Souci des champs	Asteraceae	+++
19	<i>Tulipa agenensis</i>	Tulipe d'Agen	Liliaceae	++
20	<i>Erodium cicutarium</i>	Bec-de-grue commun	Geraniaceae	+++
21	<i>Erodium malacoides</i>	Bec-de-grue à feuilles molles	Geraniaceae	++
22	<i>Asphodelus microcarpus</i>	Asphodèle à petits fruits	Asphodelaceae	+

Code d'abondance : +++ = forte, ++ = moyenne, + = faible

Les inventaires comparés (Tableaux 7 et 8) mettent en évidence une restructuration profonde de la couverture végétale. La flore noble et pérenne de la zone naturelle (comme le Chêne-liège *Quercus suber*, le Lentisque *Pistacia lentiscus* ou le Filaire *Phillyrea latifolia*), qui présentait une forte abondance (+++), disparaît intégralement de la zone industrielle. À l'inverse, la station cimenterie se voit dominée (+++) par un groupe restreint de plantes herbacées et rudérales opportunistes, telles que les Plantains (*Plantago major*, *Plantago lanceolata*), des Asteraceae épineuses ou annuelles (*Notobasis syriaca*, *Silybum marianum*, *Calendula arvensis*), et le Bec-de-grue (*Erodium cicutarium*). On note également l'apparition exclusive en zone industrielle de taxons de milieux humides ou modifiés comme *Juncus acutus* et *Typha latifolia*.

L'inventaire floristique réalisé au cours de la période printanière au niveau de la station témoin (Zone Naturelle) a permis de recenser une phytocénose riche et équilibrée comprenant 55 **taxons** répartis sur une grande diversité de familles botaniques (Lamiaceae, Fabaceae, Asteraceae, Fagaceae, Oleaceae, etc.).

L'analyse du tableau d'abondance de la zone naturelle met en évidence un écosystème climax méditerranéen stable et préservé :

- **Les espèces structurantes majeures (Abondance +++)** : On note la forte dominance d'essences sylvatiques et de maquis nobles caractéristiques de la Wilaya d'El Tarf, telles que le Chêne-liège (*Quercus suber*), le Lentisque (*Pistacia lentiscus*), l'Olivier sauvage (*Olea europaea*), et le Filaire (*Phillyrea latifolia*). Cette strate arborée et arbustive témoigne d'un sol non perturbé, capable de soutenir des cycles biologiques longs.
- **Une strate herbacée diversifiée (Abondance +++ et ++)** : La présence abondante d'espèces comme le Romarin australien (*Westringia fruticosa*), l'Asphodèle (*Asphodelus microcarpus*), le Trèfle blanc (*Trifolium repens*), et la Pâquerette (*Bellis perennis*) démontre que le complexe édaphique naturel (pH=6,86, richesse en

matière organique de 0,81% offre une niche écologique propice aux cycles saisonniers printaniers des plantes de sous-bois et de prairies.

5.1. Richesse spécifique et glissement des équilibres taxonomiques

Le premier indicateur de la dégradation environnementale réside dans l'effondrement de la richesse spécifique (S).

- La Zone Naturelle abrite une phytocénose très diversifiée avec 55 espèces recensées (fig.9), réparties au sein de familles variées et équilibrées (Lamiaceae, Fabaceae, Asteraceae, Fagaceae, Oleaceae, Rosaceae, etc.). Cette structure témoigne d'une grande hétérogénéité des niches écologiques et de conditions pédoclimatiques optimales.

- À l'inverse, la Zone Industrielle ne compte plus que 22 espèces, soit une perte de près de 60 % de la biodiversité végétale globale. Ce tri drastique démontre que la pollution polymétallique (notamment le Cadmium à 32,75 mg/kg), l'alcalinisation du sol (pH=7,62) et la perte de matière organique (0,49%) agissent comme un filtre écologique éliminant la majorité des taxons de la région.

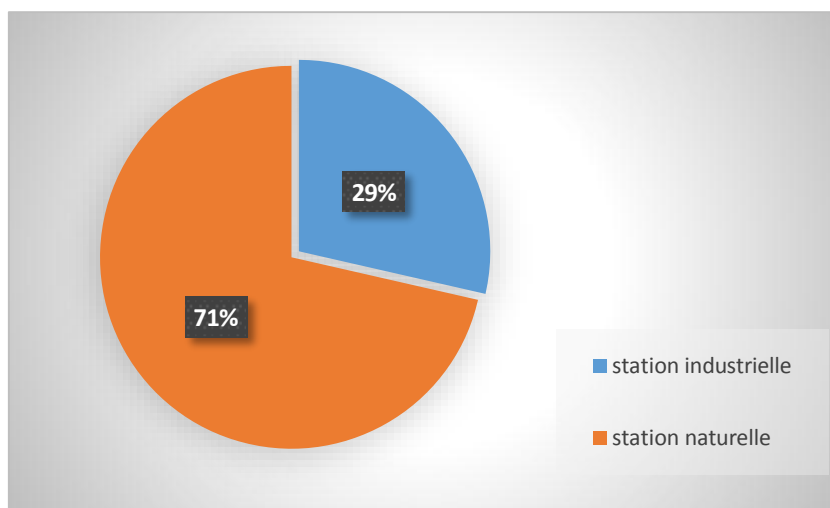


Figure 9 : Pourcentage d'espèces prospectées des deux stations industrielle et naturelle (Témoin).

VI. CONCLUSION
&
PERSPECTIVES

VI. CONCLUSION & PERSPECTIVES

VI. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Cette étude analytique et comparative, menée au niveau de la plaine d'Aïn Assel (Wilaya d'El Tarf), a permis d'évaluer avec précision l'impact des rejets atmosphériques et liquides de la cimenterie sur la qualité physico-chimique des matrices environnementales (sol et eau) et sur la structure de la biodiversité végétale périphérique.

L'analyse croisée des résultats physico-chimiques valide l'existence d'une dégradation édaphique et hydrochimique marquée à la station industrielle (Station N°2) en comparaison avec la station témoin (Zone Naturelle) :

- **Sur le plan physico-chimique** : L'activité de l'usine induit une alcalinisation nette des milieux (le pH du sol passant de 6,86 à 7,62 et celui de l'eau de 6,50 à 7,42), causée par les retombées de poussières riches en chaux (CaO). Parallèlement, on note une forte augmentation de la conductivité électrique et de la salinité, ainsi qu'une chute critique du taux de matière organique dans le sol (0,49% contre 0,81% pour le témoin), entraînant une baisse de la rétention en eau et une perte d'humidité printanière (11,17%). Au niveau de la matrice eau, l'introduction de matières en suspension a provoqué une explosion de la turbidité, atteignant un niveau très perturbé de 31 FAU ; ce qui signifie que l'eau périphérique de la cimenterie a perdu sa limpidité naturelle. Elle est saturée de poussières minérales industrielles insolubles qui bloquent la lumière. C'est un indicateur physique direct du transfert de la pollution de l'air et du sol vers l'écosystème aquatique.
- **Sur le plan de la contamination métallique** : Les analyses révèlent une pollution polymétallique préoccupante. Si le Fer, le Chrome et le Plomb approchent ou dépassent modérément les seuils de tolérance, la concentration en **Cadmium** atteint un seuil hautement critique. Dans le sol, le taux de Cadmium (32,75 mg/kg) dépasse de 10 à 30 fois les normes admissibles. Dans l'eau, sa concentration moyenne (0,494 mg/l) viole les directives sanitaires de l'OMS par un facteur spectaculaire de **164,6**, posant un risque majeur de bioamplification.

Ces perturbations physico-chimiques et métalliques se répercutent de manière drastique sur la composante biologique. L'inventaire floristique montre un effondrement de près de 60% de la richesse spécifique, la communauté végétale chutant de **55 espèces** en zone naturelle à seulement **22 espèces** en zone industrielle. Les essences nobles et calcifuges de la région (comme le Chêne-liège *Quercus suber*, le Lentisque, et le Filaire) sont totalement exclues de la

VI. CONCLUSION & PERSPECTIVES

zone anthropisée au profit d'un cortège simplifié de plantes rudérales et d'Asteraceae opportunistes (Plantains, Chardons, Souci des champs) capables de tolérer ces conditions hostiles.

En somme, les résultats de ce travail confirment que la cimenterie d'Aïn Assel exerce une pression sélective et polluante majeure, menaçant à long terme l'équilibre écologique et la biodiversité de cet écosystème fragile.

EN PERSPECTIVES

Afin de prolonger cette recherche, d'approfondir la compréhension des mécanismes de transfert des polluants et de proposer des solutions de remédiation concrètes, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

1. Approfondissement des mécanismes de transfert biologique

- **Dosage de la bioaccumulation** : Réaliser des analyses chimiques directement sur les tissus végétaux (racines, tiges, feuilles) des espèces survivant en zone industrielle afin de quantifier leur facteur de bioaccumulation et de déterminer si elles se comportent comme des plantes *exclues*, *indicatrices* ou *accumulatrices*.
- **Impacts physiologiques** : Évaluer l'effet mécanique des poussières de ciment sur l'appareil photosynthétique (taux de chlorophylle, fermeture des stomates, indice foliaire) des plantes exposées pour mesurer le stress physiologique direct.

2. Élargissement de la surveillance spatio-temporelle

- **Établissement d'un gradient de pollution** : Multiplier les points d'échantillonnage selon un transect linéaire s'éloignant de la cimenterie (par exemple tous les 500 m) afin de cartographier précisément l'aire de dispersion des contaminants en fonction des vents dominants.
- **Suivi saisonnier et spéciation** : Prolonger l'étude sur un cycle annuel complet pour évaluer l'effet du climat (lessivage par les pluies hivernales vs concentration estivale) et analyser la *biodisponibilité réelle* (spéciation chimique) des métaux lourds plutôt que leur teneur totale.

Références bibliographiques

- AFNOR. (1992). Qualité des sols – Normes françaises. Paris, France: Association Française de Normalisation.
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Collecte, tri, recyclage et valorisation des déchets. Paris, France: ADEME.
- Aissaoui, H. (2012). Effet des produits phytosanitaires et des engrais sur l'abondance des métaux lourds (Cu, Zn) dans le sol et le végétal dans la région de Biskra. Thèse de magister, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 89 p.
- Akacha, I. (2020). Impact des alcalis sur les performances du ciment. Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider de Biskra.
- Alloway, B. J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability (3rd ed.). Springer.
- Al-Zboon, K., Matalqah, W., & Ammary, B. (2021). Effect of cement industry on ambient air quality and potential health risk: A case study from Riyadh, Saudi Arabia. *Jordanian Journal of Engineering and Chemical Industries*, 4(1).
- Aranguren, M. M. S. (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes boliviennes) par des déchets miniers : approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, France, 381 p.
- Ayobami, T. M., Awobode, H. O., & Anumudu, C. I. (2023). Ecological and health risk assessment of heavy metal contamination in soil and plants around a cement factory in Ibese, Ogun State, Nigeria. *ASRIC Journal on Engineering Sciences*, 4(1), 171–182.
- Azzouz, W., & Rezig, M. (2014). Valorisation des poussières de farine crue issues de l'industrie cimentière dans le traitement des eaux urbaines. Mémoire de Licence, Université Moulay Tahar.
- Azimi, S., Rocher, V., Muller, M., Moilleron, R., & Chebbo, G. (2005). Sources of PAH, nonylphenols, bismuth and heavy metals in combined sewer systems: Case study of a Paris suburban catchment. *Water Research*, 39(19), 4661–4672.
- Bachelier, G. (1963). La vie animale dans les sols. ORSTOM.
- Bachelier, G. (1978). La faune des sols : Son écologie et son action. ORSTOM.
- Barbulescu, A., & Hosen, K. (2025). Cement Industry Pollution and Its Impact on the Environment and Population Health: A Review. *Toxics*, 13, 587.
- Belon, E., Boisson, M., Deportes, I. Z., Eglin, T. K., Feix, I., Bispo, A. O., Galsomies, L., Leblond, S., & Guellier, C. R. (2012). An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils. *Science of the Total Environment*,

Références bibliographiques

439, 87–95.

- Benahmed, M. (2017). Effet des précipitations sur la distribution du Zn et du Pb issus de retombées atmosphériques dans le sol : cas de la fonderie de Tiaret (ALFET). Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, Algérie, 140 p.
- Bernard, J. (2007). Introduction à l'étude de la médecine expérimentale. Bibliobazaar, LLC.
- Bicardot, C. (2002). Les traitements de l'eau : procédés physico-chimiques et biologiques. Ellipses, France.
- Bilen, S. (2010). Effect of cement dust pollution on microbial properties and enzyme activities in soil. *European Journal of Soil Biology*, 46(6), 370–376.
- Cardot, C. (1999). Les traitements de l'eau : Procédés physico-chimiques et biologiques. Paris: Ellipses.
- CRE. (2002). Rapport sur la qualité des eaux. Commission des Ressources en Eau.
- Dahdouh, N., Ouis, A., & Hacene, B. (2025). Ecological tax on industrial air pollution and its impact on reducing emissions in the cement industry: A case study of Lafarge Holcim cement company in Algeria. *Brazilian Journal of Business*, 7(1), 1–16.
- Dahri, L. (2019). Analyse expérimentale d'un béton avec ajout de déchet de verre coloré et non coloré (Étude comparative). Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- Deghamna, M., & Boumellit, Z. (2019). Développement d'un revêtement anti-corrosion à base de TMOS sur l'acier doux A9 et l'acier inoxydable C0400-08 via le procédé sol-gel. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma.
- Degobert, P. (1992). Automobile et pollution. Paris: Technip.
- Debabza, A. (2005). Analyse microbiologique des eaux des plages de la ville d'Annaba.
- Djebbari, O. (2020). Influence des éléments mineurs et majeurs sur la réactivité du clinker. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra.
- Emetere, M. E., & Dania, E. (2019). Short review on air pollution from cement factories. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Ernst, W. H. O. (1998). Effects of heavy metals in plants at the cellular and organismic level. In *Ecotoxicology* (pp. 587–620). Springer.
- Flora, G., Gupta, D., & Tiwari, A. (2012). Toxicity of lead: A review with recent updates. *Interdisciplinary Toxicology*, 5(2), 47–58.
- Galvez-Cloutier, R. (1995). Study of Heavy Metal Accumulation Mechanisms in the Lachine Canal Sediments. Doctoral thesis, McGill University.

Références bibliographiques

- Galvez-Cloutier, R., & Lefrançois, P. J. (2005). Sols contaminés (article technique). Vecteur Environnement.
- Gaujous, D. (1995). La pollution des milieux aquatiques : Aide-mémoire. Paris : Technique & Documentation.
- Genin, B., Cavvin, & Menarod, F. (2003). Cours d'eau et indices biologiques (pollution – méthodes – IBGN). 2^e édition, Educagri Éditions, Dijon, France, 221 p.
- Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2003). Le sol vivant. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).
- Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010). Le sol vivant : Bases de pédologie, biologie des sols. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Hamiri, M., Goudjil, T., Rouabhia, A., & Aouimeur, M. (2011). Impact de l'industrie du ciment sur l'environnement (eau-sol-air) : Cas de la cimenterie ERCE, Tébessa, Algérie. Mémoire/Étude universitaire.
- Hua, S., Tian, H., Wang, K., Zhu, C., Gao, J., Ma, Y., Xue, Y., Wang, Y., Duan, S., & Zhou, J. (2016). Atmospheric emission inventory of hazardous air pollutants from China's cement plants: Temporal trends, spatial variation characteristics and scenario projections. *Atmospheric Environment*, 128, 1–9.
- Huynh, T. (2009). Titre de l'article ou ouvrage. Éditeur/Revue.
- International Energy Agency (IEA). (2018). Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Paris : IEA.
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). CRC Press.
- Kadri, M. R., Rouigueb, S., & Chikh, H. A. (2017). Contribution à la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf. Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- Khan, S. N., Nafees, M., & Imtiaz, M. (2023). Assessment of industrial effluents for heavy metals concentration and evaluation of grass (*Phalaris minor*) as a pollution indicator. *Heliyon (Cell Press)*, 9, e20299.
- Koller, E. (2004). Traitement des pollutions industrielles : eaux, air, déchets, sol, boues. Dunod, Paris.
- Kurdowski, W. (2013). Cement and Concrete Chemistry. Springer.
- La STEP. (2019). Rapport annuel sur le traitement des eaux usées. Office/Institution.
- Margat, J. (1992). Les ressources en eau dans le monde. BRGM.
- Mebarki, H. (2013). Étude comparative des clinkers de l'Ouest algérien : Analyse

Références bibliographiques

- physico-chimique et applications. Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- Mitra, S., et al. (2022). Titre de l'article. Revue scientifique.
 - Moletta, R. (2006). Traitement des eaux usées. Paris : Tec & Doc.
 - Mouhoun, S. (2019). Caractérisation physico-chimique et microbiologique saisonnière des décharges de Aïn El Hammam et Timizart (wilaya de Tizi-Ouzou, Algérie). Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 127 p.
 - Muckensturm, B. (1973). Étude de la réaction d'oxydation anodique des carbanions en milieu DMSO. *Tetrahedron Letters*, 14(13), 1109–1112.
 - Mungyeko Bisulandu, B. J. R., & Marias, F. (2019). Modélisation de la chimie du clinker et de l'ingénierie du processus de fabrication du ciment : État de l'art. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 25(2), 528–551.
 - Napoletano, P., Guezgouz, N., Di Iorio, E., Colombo, C., Guerriero, G., & De Marco, A. (2023). Anthropogenic impact on soil heavy metal contamination in riparian ecosystems of northern Algeria. *Chemosphere (Elsevier)*, 313, 137522.
 - Nowak, C., Mossmann, J. R., & Saada, A. (2002). État des connaissances sur l'atténuation naturelle : mécanismes et mise en œuvre. Rapport d'avancement. BRGM/RP-51741-FR, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), France, 47 p.
 - Nriagu, J. O. (1996). A history of global metal pollution. *Science*, 272(5259), 223–224.
 - Ongley, E. D. (1996). *Control of Water Pollution from Agriculture*. Rome: FAO.
 - ONED. (2023). Rapport national sur l'environnement en Algérie. Alger : Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable.
 - OUZID, S. (2017). Mesure des polluants atmosphériques générés par la société des ciments de Tébessa. Mémoire de Master en Chimie, Université de Tébessa.
 - Peringer, P. (2005). Diagnostic et traitement des eaux résiduaires industrielles. Cours de postgrade, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse.
 - Pesson, P. (1971). *La pollution des sols*. Paris : Gauthier-Villars.
 - Ramade, F. (2003). *Éléments d'écologie : Écologie fondamentale*. Paris : Dunod.
 - Redon L. 2021. Terre, air et eau: le droit pénal de l'environnement au milieu du gué :D'une protection sectorielle des milieux physiques et des espaces naturels à une pénalisation de l'écocide ?. *Cahiers Droit, Sciences & Technologies*. hal-03894376.
 - Souri, M. K., Hatamian, M., & Tesfamariam, T. (2019). Plant growth stage influences heavy metal accumulation in leafy vegetables of garden cress and sweet basil. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 6, 25.

Références bibliographiques

- United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Global Environment Outlook 6: Healthy Planet, Healthy People. Nairobi: UNEP.
- Viala, A. (1998). Institution littéraire, champ littéraire et périodisation : l'institution du siècle. *Littératures classiques*, 34, 119–129.
- Hong, S. W., Lee, U., & Vierling, E. (2003). Arabidopsis hot mutants define multiple functions required for acclimation to high temperatures. *Plant Physiology*, 132, 757–767.
- Ziat, N. (2020). Étude des caractéristiques physiques et mécaniques du ciment Portland. Mémoire de Magister, Université de Bouira.
- Zouai, K. (2011). Étude du mode de fabrication du ciment et effet des matières premières : Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement. Thèse de Magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- Terwayet Bayouli, I., Terwayet Bayouli, H., Dell'Oca, A., Meers, E., & Jian, S. (2021). Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment. *Ecological Indicators*, 125, 107508.

ANNEXES

Tableau des plantes (zone naturelle)

 Westringia fruticosa	 Calicotome villosa	 Pistacia lentiscus	 Arbutus unedo
 Melilotus officinalis	 Geranium robertianum	 Borago officinalis	 Glebionis coronaria
 Silybum marianum	 Foeniculum vulgare	 Adiantum capillus-veneris	 Taraxacum officinale

ANNEXES

			
Prunus domestica	Washingtonia filifera	Sedum rubrotinctum	Ficus carica
			
Verbascum sinuatum	Sinapis arvensis	SP	Citrus sinensis
			
Quercus suber	Citrus aurantium	Olea europaea	Punica granatum
			
Phillyrea latifolia	Oxalis pes-caprae	Erica manipuliflora	Hypochaeris radicata

ANNEXES

			
Scolymus hispanicus	Anagallis arvens	Urtica dioica	Beta vulgaris
			
Malva sylvestris	Stellaria media	Sonchus oleraceus	Matricaria chamomilla
			
Chenopodium album	Morus alba	Mentha spicata	Pelargonium graveolens
			
Aloysia citrodora	Trifolium repens	Kalanchoe pinnata.	Ranunculus repens

ANNEXES

 Bellis perennis	 Ranunculus muricatus	 Plantago major	 Geranium molle
 Euphorbia peplus	 Bellis annua	 Geranium dissectum	 Sherardia arvensis
 Euphorbia characias	 Lavandula stoechas	 Asphodelus microcarpus	 Eucalyptus

ANNEXES

Tableau des plantes (zone industrielle)

 Eucalyptus	 Calicotome villosa	 Juncus acutus	 Typha latifolia
 Ranunculus repens	 Cardamine hirsuta	 Salvia viridis	 Olea europaea
 Plantago major	 Plantago lanceolata	 Notobasis syriaca	 Glebionis coronaria
 Silybum marianum	 Carthamus lanatus	 Mentha spicata	 Echium plantagineum

ANNEXES

 Hypochaeris radicata	 Calendula arvensis	 Tulipa agenensis	 Erodium cicutarium
 Erodium malacoides	 Asphodelus microcarpus		