

Impact des émissions fluorées industrielles sur les agroécosystèmes oasiens de Gabès (Tunisie) : une approche spatiale et biochimique.

Impact of industrial fluorinated emissions on the agroecosystems of the Gabès oasis (Tunisia): a spatial and biochemical approach.

Foued ALAYA

Docteur-chercheur, laboratoire BICADE-FLAH-Manouba-Tunis

Foued789h@gmail.com

Date de soumission :1/02/2026/Date d'acceptation final :08L02L2026. /Date de publication :30/06/2026.

Résumé :

Cette recherche analyse l'empreinte environnementale des émissions de fluorure d'hydrogène (HF) sur les agroécosystèmes oasiens. L'approche interdisciplinaire combine modélisation de la dispersion atmosphérique (AERMOD), analyses biochimiques et enquêtes socioéconomiques.

Les résultats révèlent une contamination critique dépassant les seuils internationaux, avec une accumulation foliaire confirmant une voie de transfert essentiellement atmosphérique. Cette pollution induit une phytotoxicité sévère et des pertes de rendement massives. L'étude met en évidence une dégradation multifactorielle menant à l'abandon des terres par les exploitants, malgré des dispositifs d'indemnisation jugés insuffisants.

Mots clés Gabès, Fluor, Pollution, Industrie, Agroécosystèmes

Abstract:

This research analyzes the environmental footprint of hydrogen fluoride (HF) emissions on oasis agroecosystems. The interdisciplinary approach combines atmospheric dispersion modeling (AERMOD), biochemical analyses and socioeconomic surveys.

The results reveal critical contamination exceeding international thresholds, with foliar accumulation confirming a primarily atmospheric transfer pathway. This pollution causes severe phytotoxicity and massive yield losses. The study highlights multifactorial degradation leading to land abandonment by farmers, despite compensation schemes that are considered insufficient.

Keywords: Gabès, Fluorine, Pollution, Industry, Agroecosystems

***Auteur correspondant :...Foued ALAYA, Foued789h@gmail.com**

Introduction

La pollution industrielle représente l'une des menaces majeures pour les écosystèmes agricoles des régions côtières semi-arides, particulièrement lorsque la proximité spatiale entre usines et cultures s'inscrit dans la durée. Ces émissions atmosphériques induisent une dégradation progressive des sols et de la végétation, entraînant des répercussions environnementales et socio-économiques délétères. À Gabès, unique oasis littorale de la Méditerranée, cette problématique est exacerbée par la cohabitation historique entre une agriculture traditionnelle et un complexe d'industrie lourde. Depuis les années 1970, l'extension de la zone industrielle (ZI), portée par le Groupe Chimique Tunisien (GCT) et les Industries Chimiques du Fluor (ICF), a radicalement altéré l'environnement local. Ces unités sont des sources critiques de composés fluorés — fluorure d'hydrogène (HF) et particules — qui se dispersent et se déposent sur les agroécosystèmes périphériques (Medhioub, 2003).

Le fluor est un agent phytotoxique documenté : au-delà de seuils critiques, il provoque des perturbations physiologiques sévères (chloroses, nécroses, chute de l'activité photosynthétique) et une baisse drastique des rendements (Weiss et al, 2003). Les cultures maraîchères et fourragères à croissance rapide y sont particulièrement sensibles.

Bien que la dégradation de l'air et des sols à Gabès ait été signalée (Ben Amor, 2014 ; El Zrelli et al, 2015 ; Taieb, 2016 ; Ayeb, 2016), les travaux quantifiant précisément les mécanismes de transfert de l'atmosphère vers les cultures à l'échelle parcellaire restent fragmentaires. De même, l'impact socio-économique et les stratégies d'adaptation des agriculteurs manquent encore d'une approche intégrée. Les localités de Ghannouch, Bouchemma et Chott Essalem, situés à moins de 3 km de la ZI et sous l'influence des vents dominants, sont en première ligne. Les exploitants y observent des symptômes récurrents de phytotoxicité sur la carotte (*Daucus carota*), la luzerne (*Medicago sativa*) et les arbres fruitiers, entraînant des pertes économiques rarement évaluées de manière systématique.

La présente étude vise à caractériser cette pollution fluorée via une approche multidisciplinaire combinant :

1. La mesure des concentrations de fluor (air, sols, végétaux) ;
2. L'analyse spatiale de la contamination ;
3. L'évaluation des impacts phytotoxiques et socio-économiques par enquêtes et observations de terrain.

L'utilisation d'un site témoin à Bsissi (20 km) permet d'isoler l'influence industrielle des variables environnementales naturelles. Ce travail entend fournir des données objectives pour identifier les zones vulnérables et orienter la gestion des risques agroenvironnementaux dans l'agglomération de Gabès.

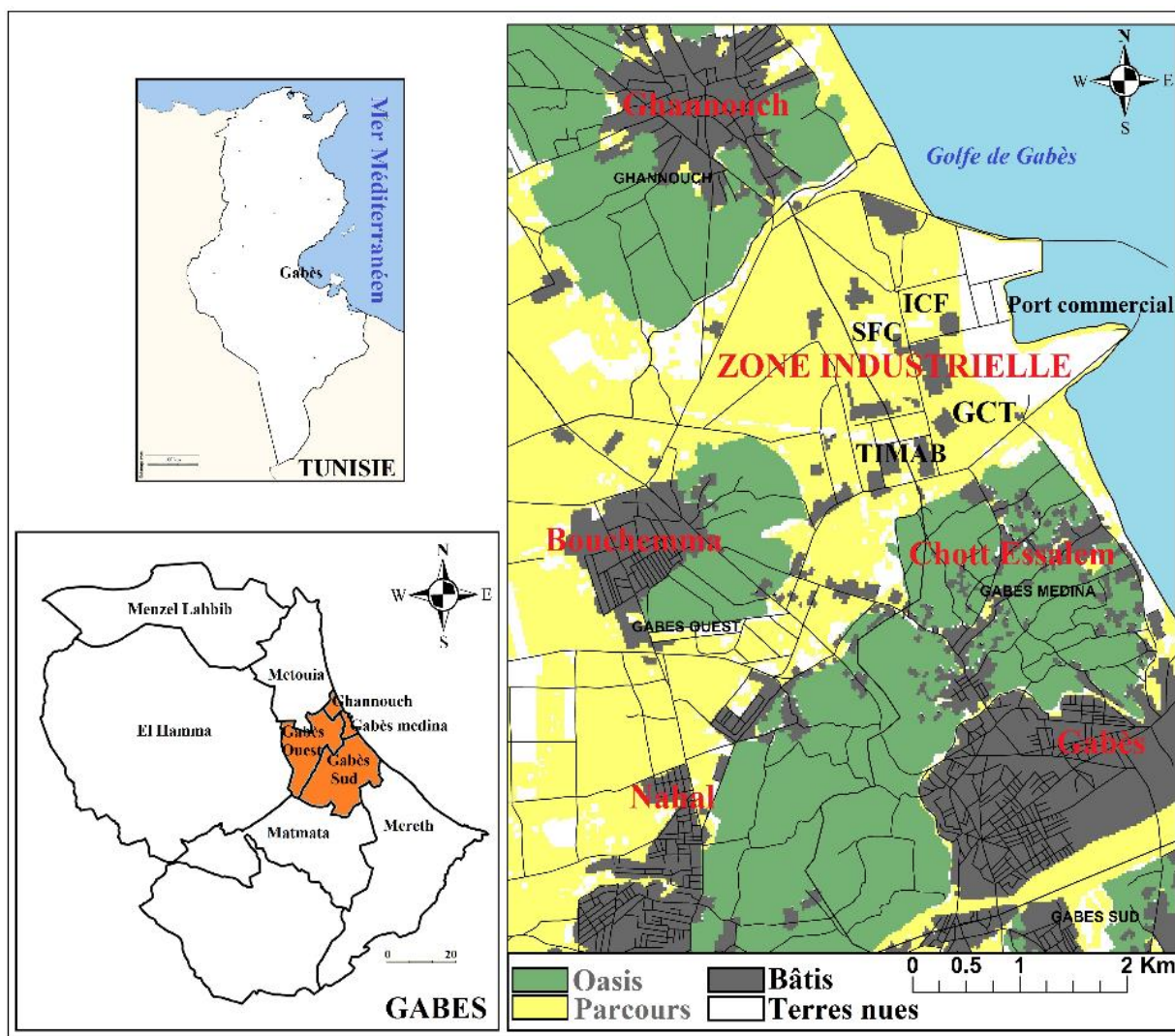
I Méthodes et outils

A) Zone d'étude et sites d'échantillonnage

L'étude se concentre sur le pôle industriel de Gabès et sa périphérie agricole. Cette zone abrite des unités chimiques majeures : le Groupe Chimique Tunisien (GCT), TIMAB (production de phosphate monocalcique) et SFC (production de TSP), identifiées comme les sources prépondérantes d'émissions de fluorures (HF et poussières).

La zone d'étude (figure 1) couvre un rayon d'environ 3 km autour de la ZI et comprend trois secteurs agricoles particulièrement exposés : Ghannouch, au nord-est, directement sous l'influence des vents dominants ; Bouchemma à l'ouest, caractérisé par une agriculture maraîchère et fourragère intensive ; et Chott Essalem au sud-est, correspondant à une zone de transition entre terres agricoles et zones urbanisées (ALAYA, 2019).

Figure 1. Localisation de la zone d'étude



Source : Carte agricole, 2022.

Un site témoin, situé à Bssisi (20 km au nord de la zone industrielle), a été sélectionné pour établir les valeurs de référence régionales, hors de l'influence directe des retombées industrielles.

B) Stratégie d'échantillonnage et préparation des échantillons

L'échantillonnage spatial a été conçu pour capturer la variabilité de la contamination selon la distance aux sources et les vents dominants. Tous les points de prélèvement ont été géoréférencés. Les cultures ciblées incluent la luzerne (*Medicago sativa*), les cucurbitacées, l'olivier (*Olea europaea*) et divers arbres fruitiers (abricotier, figuier).

Les sols : Des échantillons composites ont été prélevés dans l'horizon superficiel (0–20 cm), zone de contact direct avec les dépôts atmosphériques et siège de l'activité racinaire. Après séchage à l'air et tamisage (< 2 mm), les paramètres physico-chimiques (pH, texture, matière organique) ont été analysés pour évaluer la mobilité du fluor.

Les végétaux : Les prélèvements ont porté sur les parties aériennes (feuilles, fruits, écorces). Afin de distinguer le fluor intégré des dépôts de surface, les échantillons ont été lavés à l'eau distillée, séchés à température contrôlée, puis broyés.

C) Collecte des données et analyses chimiques

Les teneurs en fluor ont été déterminées au laboratoire du Centre de Recherches et des Technologies des Eaux (CERTE, Tunis) selon des protocoles standards. La phytotoxicité a été évaluée par une

double approche : qualitative (observation de nécroses, chloroses et brûlures) et quantitative (mesure de la biomasse sèche et de la vigueur).

Parallèlement, les données de pollution atmosphérique (HF) ont été compilées à partir des archives de l'ANPE (campagnes de mesure entre 2007 et 2018) et des relevés récents du GCT (programme de dépollution 2022).

D) Enquête socio-économique et perception locale

Une enquête de terrain a été menée auprès de 30 agriculteurs répartis dans les oasis de Ghannouch, Bouchemma et Chott Essalem. À l'aide d'un questionnaire semi-directif (14 indicateurs), l'étude a recueilli des données sur :

- La structure des parcelles (superficie, types d'agricultures...).
- L'exposition aux polluants et la fréquence des incidents de pollution perçus.
- L'évaluation des dégâts de production et l'efficacité des mécanismes d'indemnisation.

Les données recueillies ont fait l'objet d'une analyse thématique croisée avec les mesures physico-chimiques pour valider la cohérence entre les impacts observés et les niveaux de contamination mesurés

II Résultats

A) Contribution des principales sources industrielles aux émissions de HF

Les fluorures désignent l'ensemble des formes chimiques du fluor présentes dans l'environnement, incluant les composés gazeux, dissous et particulaires. Dans les zones industrielles, le fluor est principalement émis dans l'atmosphère sous forme de fluorure d'hydrogène (HF) et de fluorures particulaires, notamment lors des procédés de transformation des phosphates et de production d'acide phosphorique (Bonte, 1991 ; Ben Abdallah et al, 2006).

Tableau 1. Emissions spécifiques (en g/s) des principales sources de pollution atmosphérique dans la région de Gabès :

Polluant	GCT	ALKIMIA	ICF	TIMAB	SFC
HF	3,65	0,013	0,002	0,30	0,061
%	90.66	0.32	0.04	7.45	1.5

Source : GCT, 2022 (page 43)

Le Tableau 1 révèle une forte disparité dans les contributions des unités industrielles aux émissions de fluorure d'hydrogène (HF) dans la région de Gabès. Le Groupe Chimique Tunisien (GCT) s'impose comme la source prépondérante, avec un flux spécifique estimé à 3,65 g/s, soit 90,66 % des rejets fluorés atmosphériques totaux. Cette hégémonie s'explique par les procédés de transformation des phosphates et de production d'acide phosphorique, intrinsèquement générateurs de composés fluorés volatils en l'absence de systèmes de captation à haute efficacité (Ben Abdallah et al, 2006)

À un niveau nettement inférieur, l'unité TIMAB constitue la seconde source émettrice avec 0,30 g/s (7,45 %). Bien que les contributions d'ALKIMIA, ICF et SFC soient marginales par rapport au GCT, elles participent à la charge polluante cumulative affectant les zones agricoles limitrophes. Ces émissions secondaires peuvent s'avérer critiques lors de conditions météorologiques stables (inversions thermiques) limitant la dispersion atmosphérique (Elloumi et al, 2017).

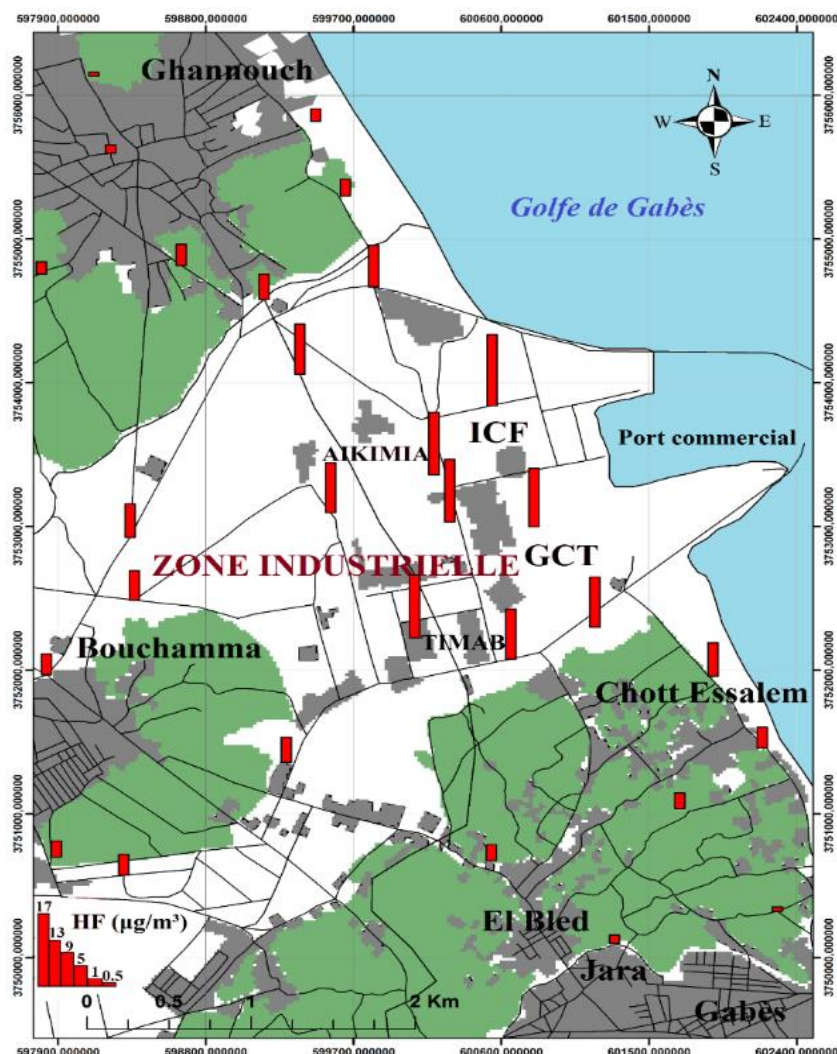
En somme, ces données démontrent que la pollution fluorée à Gabès est structurellement liée à une source majeure unique, le GCT, complétée par des apports secondaires mais cumulatifs. Cette hiérarchisation des sources est fondamentale pour :

- ✓ Orienter les stratégies de réduction des émissions à la source.
- ✓ Prioriser les actions de contrôle environnemental.
- ✓ Interpréter les gradients spatiaux de contamination observés dans les agrosystèmes environnants (Stevens et al., 2011).

B) Mesures de terrain et modélisation AERMOD

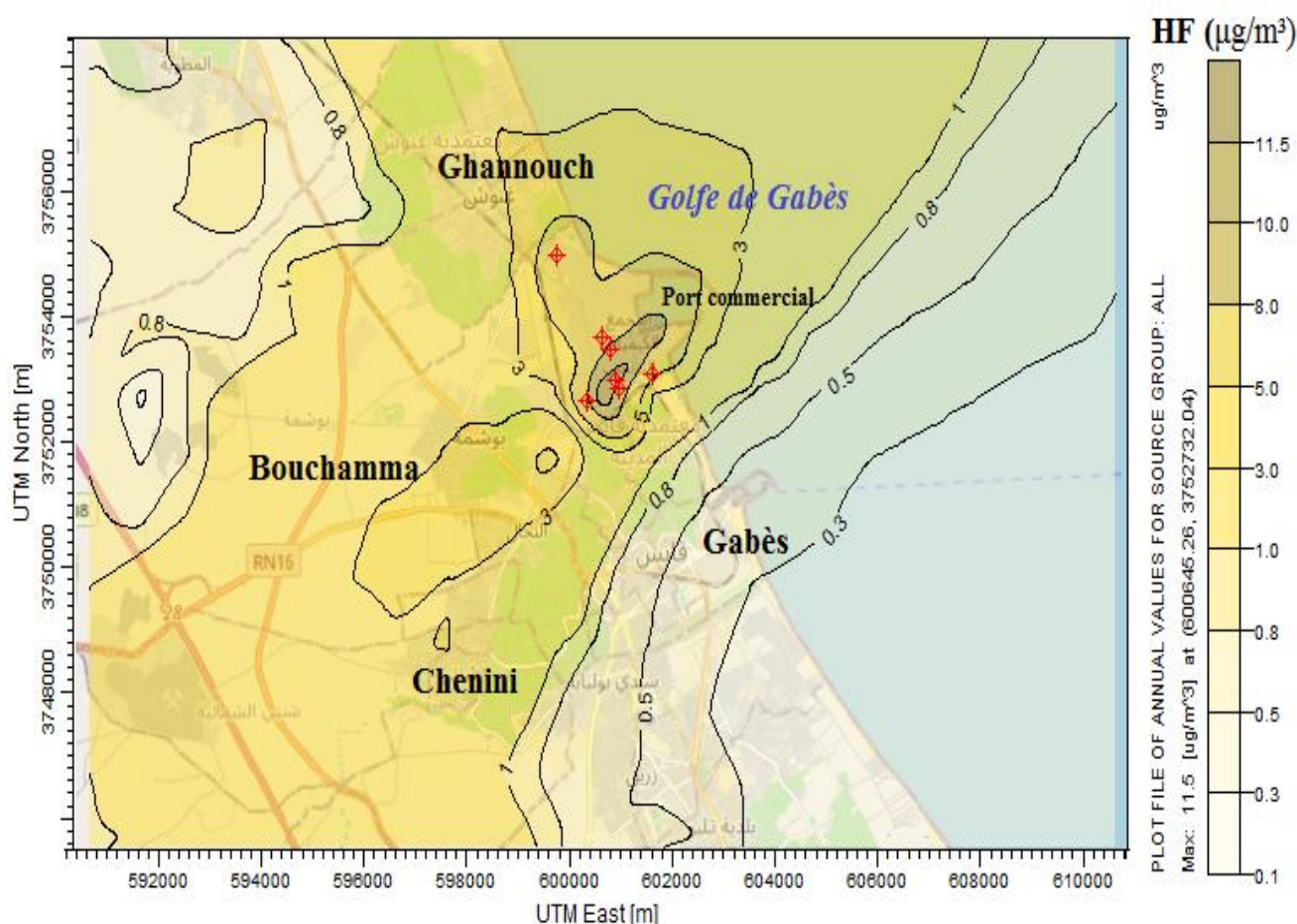
Le HF est un gaz hautement réactif, très soluble dans l'eau et caractérisé par une forte affinité pour les surfaces minérales et biologiques (Kierdorf et Kierdorf, 2001 et 2005). Après son émission, il peut être transporté sur de courtes distances avant de se déposer par dépôt sec, via l'adsorption directe sur les feuilles et les sols, ou par dépôt humide lors des précipitations (Stevens et al., 2011). Au contact de l'humidité atmosphérique ou des surfaces végétales, le HF se dissocie rapidement en ions fluorure (F^-), forme chimiquement stable qui s'accumule dans les sols et pénètre dans les plantes soit par voie foliaire à travers les stomates, soit par absorption racinaire (Mezghani et al, 2005 ; Lohe, 2015). Cette transformation favorise la bioaccumulation du fluor dans les tissus végétaux, où il interfère avec les processus physiologiques essentiels, entraînant des symptômes de phytotoxicité tels que la chlorose, la nécrose foliaire et la réduction de la croissance (Tiwar, 2006).

Figure N° 2. Concentrations de HF dans la ZI et les localités riveraines



Source ANPE et GCT, 2007/2022

Figure 3. Modélisation de HF par AIRMOD



Les figures 2 et 3 (2 cartes) synthétisant les mesures de fluorure d'hydrogène (HF) issues des campagnes de mesure réalisées par l'ANPE et le GCT, ainsi que les résultats de la modélisation atmosphérique par AERMOD, met en évidence une cohérence globale entre les observations in situ et la structure spatiale du panache polluant simulé. Les concentrations mesurées les plus élevées sont localisées au cœur et à proximité immédiate de la zone industrielle de Gabès, en particulier autour des unités industrielles, confirmant leur rôle prépondérant en tant que sources ponctuelles d'émission de fluorures (Weiss et al, 2003).

Les mesures de terrain, représentées par les battons rouges, indiquent des concentrations de HF atteignant localement des valeurs supérieures à $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les secteurs centraux de la ZI, avec une nette décroissance vers les zones agricoles périphériques. Cette distribution spatiale traduit une exposition directe et chronique des espaces agricoles de Ghannouch, Bouchemma et Chott Essalem, situés à faible distance des sources industrielles, ce qui est en accord avec les observations de phytotoxicité rapportées sur le terrain.

Les teneurs de HF mesurées dans l'air ambiant autour de la zone industrielle (ZI) de Gabès, comprises entre $0,5$ et $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dépassent fréquemment les valeurs de référence recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour l'air extérieur, fixées autour de $2-3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Elles sont également nettement supérieures aux niveaux généralement observés dans les programmes internationaux de surveillance de la qualité de l'air, notamment aux États-Unis, où les concentrations de HF dans l'air ambiant sont généralement comprises entre $0,5$ et $1,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en milieu urbain, et entre $0,016$ et $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en milieu rural.

Ainsi, les concentrations maximales mesurées dans la zone d'étude peuvent être jusqu'à 10 fois supérieures aux valeurs guides de l'OMS, et plusieurs dizaines à plus de mille fois supérieures aux

niveaux de fond rapportés en milieux ruraux non industrialisés. Ces dépassements traduisent une pression de pollution fluorée élevée et persistante sur les zones agricoles exposées, susceptible de favoriser des dépôts atmosphériques importants de fluor et d'expliquer les impacts observés sur les sols et la végétation.

La carte de modélisation spatiale des concentrations annuelles moyennes de fluorure d'hydrogène (figure 3), met en évidence une structuration marquée de la pollution atmosphérique autour de la zone industrielle (ZI) de Gabès. Les concentrations les plus élevées, dépassant localement 10–11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sont observées à proximité immédiate des sources de pollution. L'organisation des isoconcentrations en auréoles concentriques et allongées traduit un gradient décroissant des concentrations avec l'éloignement de la source, caractéristique d'une pollution atmosphérique d'origine ponctuelle.

La dissymétrie spatiale du panache, orientée préférentiellement vers les secteurs agricoles situés sous l'influence des vents dominants, souligne le rôle déterminant des conditions météorologiques locales dans la dispersion du HF (Vike, 1999). La modélisation réalisée à l'aide du modèle AERMOD reproduit fidèlement cette configuration, en mettant en évidence un panache allongé dirigé principalement vers le sud et le sud-est de la ZI, en concordance avec les observations de terrain et les mesures disponibles. Cette cohérence spatiale entre concentrations simulées et mesurées renforce la robustesse du modèle et sa capacité à représenter les processus de dispersion atmosphérique du HF à l'échelle locale.

Les secteurs de Ghannouch et Bouchemma, situés dans l'axe principal de dispersion, apparaissent ainsi comme les zones les plus exposées, avec des concentrations comprises entre 3 et 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, voire localement supérieures. De tels niveaux sont susceptibles de générer des dépôts atmosphériques significatifs, favorisant l'accumulation du fluor dans les sols et la végétation, et contribuant à l'apparition de symptômes de phytotoxicité sur les cultures maraîchères et fourragères. À l'inverse, les zones plus éloignées de la ZI, notamment au-delà d'un rayon d'environ 3 km, présentent des concentrations nettement plus faibles ($< 0,5\text{--}1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), traduisant une atténuation progressive de l'influence industrielle et confirmant la pertinence du site témoin situé hors de l'empreinte directe du panache polluant.

Néanmoins, des écarts ponctuels entre les concentrations mesurées et simulées sont observés dans certaines parcelles agricoles. Ces différences peuvent s'expliquer par la variabilité temporelle des émissions industrielles, les effets des conditions micro-météorologiques locales et les processus de dépôt sec du HF, qui ne sont pas entièrement intégrés dans la modélisation (Vike, 1999). Dans son ensemble, cette approche intégrée de cartographie et de modélisation met en évidence une empreinte atmosphérique nette des émissions fluorées, cohérente avec la distribution spatiale des impacts environnementaux observés sur le terrain. Elle constitue un outil essentiel pour relier les sources industrielles aux zones agricoles affectées, analyser les transferts air-sol-plante et orienter les stratégies de surveillance et de gestion du risque environnemental autour de la zone industrielle de Gabès (Taieb, 2016).

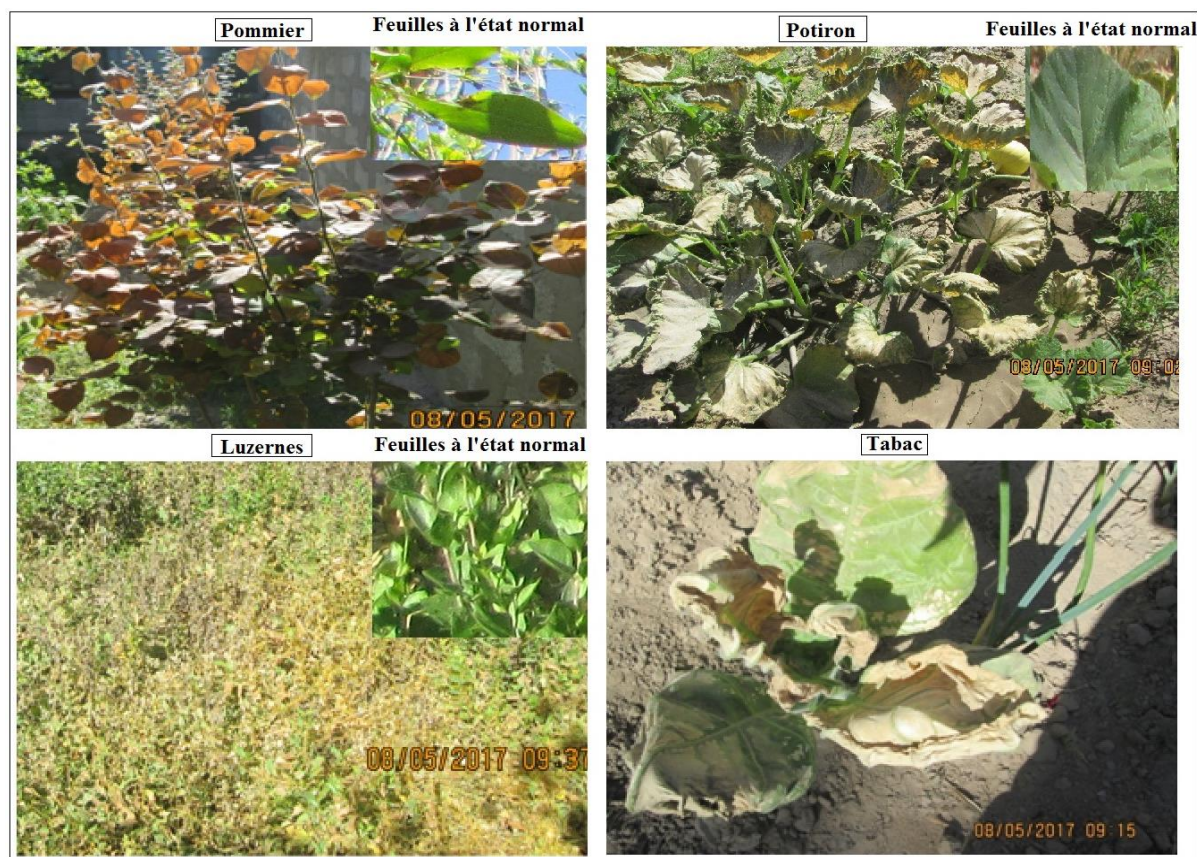
C) Épisode aigu de pollution du 6 mai 2017

Le complexe chimique de Gabès constitue depuis 1972 une source majeure de pressions environnementales sur les oasis littorales du sud-est tunisien. Parmi les polluants émis le SO_2 , les PM_{10} et les composés fluorés, notamment le fluorure d'hydrogène (HF), sont reconnus pour leur forte phytotoxicité et leur capacité à provoquer des dommages rapides et sévères sur la végétation exposée. Le 6 mai 2017, une fuite de gaz d'origine industrielle a été signalée au niveau du complexe chimique, affectant particulièrement la région oasienne de Bouchemma.

À la suite de cet incident, une mission d'inspection menée par le Commissariat Régional de Développement Agricole (CRDA) de Gabès a permis de documenter les dégâts agricoles observés sur le terrain. En parallèle, des analyses de fluor ont été réalisées sur des échantillons de sols et de végétaux prélevés sur plusieurs sites.

Les travaux de terrain ont été réalisés donc en collaboration avec le CRDA de Gabès, dans le cadre d'un travail académique portant sur la pollution environnementale dans la région de Gabès. Le but est de caractériser la nature, l'intensité et les modes de transfert de la contamination fluorée. Les données analytiques issues de cette mission nous ont été mises à disposition et ont été complétées par des prélèvements supplémentaires réalisés le même jour dans les localités de Ghannouch et de Chott Essalem, qui ont connu le même phénomène de phytotoxicité.

Figure 4. Dégâts de la pollution sur l'agriculture à Bouchamma-Gabès



Source : Clichés ALAYA. F, 08/05/2017

L'inspection menée le 8 mai 2017, soit deux jours après l'incident, a couvert une superficie d'environ 10 hectares appartenant à une vingtaine d'agriculteurs. Elle a mis en évidence des symptômes généralisés de phytotoxicité, se manifestant à des degrés variables selon les cultures et les espèces arborées (figure 2). Les principaux signes observés incluent un dessèchement rapide des tissus végétaux, une rigidité anormale des feuilles et des tiges, ainsi qu'une altération visible de la vigueur des plantations. Les observations de terrain ont révélé la présence de nécroses, de chloroses ainsi qu'un jaunissement marqué des feuilles, constituant les principaux dégâts morphologiques recensés sur l'ensemble des sites étudiés. D'après le rapport du CRDA, la proportion de surface foliaire affectée par la nécrose varie de 30 à 70 %, notamment chez les espèces à grandes feuilles.

Les dégâts observés étaient particulièrement prononcés chez les arbres fruitiers à larges feuilles, notamment les figuiers, mais concernaient également les cultures maraîchères (fèves, courges, citrouilles, concombres, etc.), les plantes aromatiques (menthe, rosier), ainsi que des espèces pérennes telles que les oliviers, les abricotiers et la vigne. Toutefois, la vulnérabilité et l'expression des symptômes de toxicité varient selon les espèces. Les oliviers et les palmiers dattiers apparaissent globalement moins sensibles que les autres cultures étudiées. Cette variabilité interspécifique suggère

des différences de tolérance physiologique aux polluants atmosphériques, possiblement liées à la morphologie foliaire, à l'épaisseur de la cuticule ou aux mécanismes de défense propres à chaque espèce (Werakkody et al, 2017).

La commission a souligné le caractère évolutif des dégâts, tant en superficie qu'en intensité, suggérant une exposition atmosphérique persistante ou différée après l'événement initial.

D) Concentrations en fluor dans les sols et la végétation

Les analyses chimiques effectuées aux laboratoires de CERTE, révèlent des concentrations extrêmement élevées en fluor dans les tissus végétaux des sites situés à proximité immédiate du complexe chimique. Les valeurs les plus fortes sont enregistrées dans les sites localisés à 500 m et 1 km de la source industrielle, où les concentrations atteignent jusqu'à 2047 mg/kg dans les cucurbitacées, 1866 mg/kg dans la luzerne, plus de 1600 mg/kg dans les arbres fruitiers et environ 1500 mg/kg dans les feuilles de tabac.

Table N° 2. Concentrations en fluor dans les sols et la végétation dans quelques sites.

sites	Site témoin (20 km de la ZI)	Site 1 Chott Essalem (à 500 km de GCT)	Site 2 Bouchamma (à 500 m de GCT)	Site 3 Bouchamma (à 1 km de GCT)	Site 4 Ghannouch (à 2 km de GCT)	Site 5 Ghannouch (à 3 km de GCT)
Cucurbitacées	10.5	2047.36	1965.33	1734.56	1876.55	874
Luzerne	14	1866	1644.84	1168.32	1419	645
Figuers	13	1665	1488.74	1547.22	1148.62	495.55
Tabac	11	1485	1578.15	1353.66	1256.58	428.65
Sol	242.66	1180.35	1030.25	1236.77	1422.55	521.67

Source : Résultats des analyses chimiques, laboratoires de CERTE, 2017

Les résultats (tableau 2) montrent un gradient spatial très net des concentrations en fluor, aussi bien dans les sols que dans les végétaux, en fonction de la distance par rapport au complexe chimique de Gabès (GCT). Ce gradient exclut une origine purement géogénique ou pédologique de la contamination. Il traduit, au contraire, l'impact d'une source ponctuelle et localisée, compatible avec un rejet industriel accidentel.

Le site témoin, situé à 20 km de la zone industrielle, présente des teneurs faibles dans les végétaux (8 à 13 mg/kg) et dans le sol (242,66 mg/kg), correspondant à des niveaux de fond naturels, compatibles avec des milieux non pollués. À l'inverse, les sites situés à proximité immédiate du GCT (500 m à 1 km) enregistrent des concentrations très élevées, traduisant une forte influence des émissions industrielles fluorées. Une diminution progressive des teneurs est observée à mesure que l'on s'éloigne de la source, notamment à Ghannouch (2 à 3 km), sans toutefois revenir aux niveaux de référence.

Les cultures de l'ensemble des sites étudiés aux alentours du GCT enregistrent des concentrations atteignant des niveaux extrêmes, allant de 428,65 mg/kg pour le tabac (site 5) à plus de 2000 mg/kg pour les cucurbitacées (site 1). Ces valeurs dépassent les seuils de phytotoxicité généralement admis, situés autour de 30 à 50 mg/kg de matière sèche, de plusieurs ordres de grandeur, soit entre 8 et 40 fois. Même à 3 km, les teneurs restent supérieures au fond naturel, traduisant une empreinte spatiale étendue de la pollution fluorée.

Les sols présentent également des teneurs élevées en fluor dans les zones impactées, avec des valeurs comprises entre 1000 et 1400 mg/kg à proximité du complexe chimique, contre seulement 242,66 mg/kg au site témoin. Les valeurs de référence généralement admises pour le fluor total dans les sols sont comprises entre 100 et 400 mg/kg pour les sols non contaminés. Des concentrations supérieures

à 500 mg/kg traduisent une contamination anthropique significative (Weissmannová et Pavlovský, 2017).

Toutefois, un résultat majeur réside dans le fait que, dans la majorité des sites contaminés, les concentrations mesurées dans les feuilles sont supérieures à celles du sol. Ce constat constitue un argument déterminant en faveur d'une absorption directe par voie atmosphérique. En effet, le fluor est connu pour être faiblement mobile dans le sol et peu assimilable par les racines. En revanche, sous forme gazeuse (HF) ou particulaire, il est rapidement absorbé par les feuilles via les stomates, où il s'accumule et provoque des lésions cellulaires irréversibles.

E) Relation entre concentrations mesurées et dégâts observés

Des concentrations comprises entre 1 000 et 2 000 mg/kg expliquent largement les symptômes observés lors des inspections de terrain, notamment le dessèchement rapide des tissus, leur rigidification, l'apparition de nécroses ainsi qu'une baisse significative de la productivité. Les cultures maraîchères (tabac, Cucurbitacées) et les plantes aromatiques, en raison de leur importante surface foliaire et de leur métabolisme élevé, apparaissent particulièrement sensibles à la contamination. En revanche, les arbres fruitiers tels que les oliviers et les palmiers, bien que physiologiquement plus tolérants (Bakiyaraj et Ayyappan, 2014 ; Baunthiyal et Ranghar, 2015), présentent des niveaux de contamination faibles à modérés.

Ces résultats confirment que la végétation joue un rôle de bioindicateur particulièrement sensible des pollutions fluorées atmosphériques, souvent plus révélateur que le sol, dont la contamination peut être plus lente et partiellement masquée par des processus de fixation.

L'analyse croisée des observations de terrain et des résultats analytiques met en évidence l'impact sévère de la fuite de gaz du 6 mai 2017 sur les agroécosystèmes oasiens de Bouchemma. Les concentrations exceptionnellement élevées en fluor dans les tissus végétaux, largement supérieures à celles du sol, constituent un indicateur clair d'une pollution atmosphérique fluorée aiguë d'origine industrielle.

F) Impacts de la pollution industrielle sur l'agriculture oasienne et les agriculteurs

L'agriculture oasienne de Gabès constitue un système productif fragile, fortement dépendant de la qualité des sols, de l'eau et de l'air. L'implantation et le fonctionnement du complexe chimique ont profondément modifié cet équilibre, exposant les cultures à des niveaux élevés de polluants atmosphériques et de retombées particulières, avec des conséquences directes sur les rendements agricoles et les moyens de subsistance des agriculteurs.

Une étude d'expertise environnementale menée en 2003 par Medhioub (2003), dans un cadre judiciaire, a permis de mettre en évidence l'ampleur des impacts directs de la pollution industrielle sur les cultures oasiennes. Les résultats montrent qu'un niveau élevé de pollution atmosphérique peut entraîner une réduction d'environ 50 % de la production de henné et 65 % de celle de la luzerne, cultures largement pratiquées dans les oasis de Gabès. Les pertes sont encore plus sévères pour certaines cultures sensibles, atteignant 90 % pour le tabac et 80 % pour les palmiers dattiers, qui constituent pourtant l'un des piliers économiques, écologiques et patrimoniaux des oasis gabésiennes. Ces chiffres traduisent une dégradation profonde de la productivité agricole, liée notamment aux effets phytotoxiques des gaz acides (fluorures, SO₂), à l'altération des feuilles, à la baisse de la photosynthèse et à l'appauvrissement progressif des sols.

Au-delà des pertes agronomiques, ces impacts figurent également dans l'évolution des dispositifs de compensation financière accordés aux agriculteurs sinistrés. Les données de l'URAP (Union Régionale d'Agriculture et de la Pêche, Gabès, 2017), synthétisées dans la figure 4, mettent en évidence une augmentation spectaculaire du nombre d'agriculteurs indemnisés par le Groupe Chimique Tunisien (GCT). Celui-ci est passé de 22 agriculteurs en 2005 à 106 en 2009, puis à 687 en 2017, soit une multiplication par plus de 31 en l'espace de 12 ans. Cette dynamique traduit à la fois l'aggravation des dommages agricoles et une reconnaissance progressive des préjudices subis.

Parallèlement, les surfaces agricoles endommagées ont connu une évolution similaire, passant de 14 ha en 2005 à 57 ha en 2009, puis à 288 ha en 2017, soit une augmentation d'environ 20 fois sur la même période. Cette croissance s'explique non seulement par l'intensification et la persistance de la pollution industrielle, mais aussi par une prise de conscience accrue des agriculteurs, davantage sensibilisés aux risques environnementaux et plus enclins à déclarer les dommages subis à leurs exploitations.

En revanche, l'analyse spatiale du système de compensation révèle une forte inégalité territoriale. Les indemnités concernent exclusivement les agriculteurs de trois zones : Ghannouch, Bouchemma et Chott Essalem, situées à proximité immédiate de la zone industrielle. Selon le GCT, les autres zones du gouvernorat sont exclues de ces dispositifs en raison de leur éloignement du pôle industriel et de leur exposition jugée plus faible aux polluants. Cette approche repose principalement sur un critère de distance, sans toujours intégrer la variabilité des conditions météorologiques (vents dominants, stabilité atmosphérique) ni les effets cumulatifs à long terme, ce qui soulève des interrogations quant à l'équité et à l'exhaustivité des mécanismes de reconnaissance des dommages. Par ailleurs, le montant des compensations financières accordées montre une augmentation notable, passant de 17 mille dinars en 2005 à 184 mille dinars en 2009, puis à 6,3 millions de dinars en 2017. Toutefois, ces compensations demeurent dégressives avec l'éloignement de la zone industrielle et ne compensent pas toujours la totalité des pertes subies. Certains agriculteurs perçoivent des indemnités de manière récurrente depuis 2005, ce qui traduit le caractère chronique de la pollution et l'absence de solutions structurelles durables pour protéger l'agriculture oasienne.

En définitive, l'impact de la pollution industrielle sur l'agriculture à Gabès se manifeste à la fois par une chute drastique des rendements, une extension des surfaces dégradées, et une vulnérabilité socio-économique croissante des agriculteurs. Les mécanismes de compensation, bien qu'ils constituent une reconnaissance partielle des préjudices, apparaissent insuffisants face à l'ampleur et à la persistance des dommages, soulignant la nécessité d'actions préventives, de politiques de réduction des émissions et d'une prise en charge plus équitable et intégrée des territoires affectés.

En outre, les teneurs mesurées rendent les productions agricoles des sites impactés impropres à la consommation, posant un risque potentiel pour la chaîne alimentaire et la santé humaine. Elles traduisent également un préjudice économique majeur pour les agriculteurs concernés et soulignent la vulnérabilité des oasis littorales de Gabès face aux accidents industriels.

G) Résultats de l'enquête auprès des agriculteurs

Les résultats montrent une exposition chronique et continue des exploitations agricoles aux pollutions industrielles. La majorité des agriculteurs interrogés déclarent être exposés depuis plusieurs décennies (entre 20 et 30 ans pour 71.7% des agriculteurs), souvent depuis l'installation ou l'extension des unités chimiques.

Cette exposition est perçue comme permanente, avec des épisodes plus aigus liés aux conditions météorologiques (vents dominants, périodes sèches), favorisant la dispersion des gaz et des poussières polluantes sur les terres agricoles.

L'enquête met en évidence une régression significative et durable des rendements agricoles. Les agriculteurs interrogés signalent une baisse progressive de la productivité des palmiers dattiers, accompagnée d'une réduction importante des rendements du henné et de la luzerne, ainsi que de pertes récurrentes affectant les cultures maraîchères. Dans plusieurs cas, les pertes sont décrites comme totales (47.3 % des enquêtés), les récoltes étant entièrement endommagées ou devenues impropres à la commercialisation.

Les résultats indiquent que certaines cultures ont subi des dommages irréversibles se traduisant par des brûlures foliaires, un dessèchement prématuré des plantes, une chute anticipée des fruits et une mortalité partielle ou totale des pieds cultivés. Ces atteintes ont conduit, dans de nombreux cas, à l'abandon définitif de certaines cultures, jugées particulièrement sensibles à la pollution industrielle, notamment les arbres fruitiers tels que les abricotiers, les poiriers et les figuiers.

La majorité des agriculteurs déclarent une dégradation progressive de la qualité des sols, caractérisée par une perte de fertilité, une modification de la structure pédologique, une salinisation accrue et une diminution de la capacité de rétention en eau. Cette dégradation est attribuée à la combinaison des dépôts atmosphériques polluants, à la qualité dégradée de l'eau d'irrigation et à l'appauvrissement organique des sols, affectant durablement leur potentiel productif.

La régression des rendements s'accompagne d'une baisse significative des revenus agricoles. Pour de nombreux ménages (64.6 % des agriculteurs), l'activité agricole ne permet plus d'assurer un revenu stable, ce qui entraîne une diversification contrainte des sources de revenus, un endettement croissant et une dépendance accrue à des activités non agricoles. Cette situation contribue à renforcer la vulnérabilité socio-économique des agriculteurs oasiens.

Les résultats révèlent un processus d'abandon progressif des terres agricoles, qui se manifeste par la mise en jachère prolongée de certaines parcelles, la réduction des surfaces cultivées et, dans certains cas, l'abandon total de l'activité agricole. Ce phénomène est particulièrement marqué chez les petits exploitants et les agriculteurs âgés, pour lesquels la poursuite de l'activité n'est plus économiquement viable.

Une partie des agriculteurs enquêtés déclare avoir bénéficié de mécanismes d'indemnisation ou de dédommagement de la part du Groupe Chimique Tunisien, notamment à la suite de pertes agricoles importantes. Toutefois, ces indemnisations sont jugées irrégulières, insuffisantes au regard des pertes réelles et limitées à certains épisodes ou exploitations, sans permettre de compenser la dégradation structurelle et cumulative des systèmes agricoles.

L'enquête met en évidence un système agricole oasien profondément fragilisé, soumis à une pollution industrielle chronique ayant entraîné une régression durable des rendements, une dégradation avancée des sols, une baisse significative des revenus agricoles et un abandon progressif des terres et de l'activité agricole. Ces résultats confirment le rôle central de la pollution industrielle comme facteur structurant de la vulnérabilité agricole dans les oasis littorales de Gabès.

III Discussion

Les résultats obtenus confirment l'existence d'une pollution fluorée industrielle marquée et spatialement structurée autour de la zone industrielle de Gabès, avec des impacts agroenvironnementaux significatifs sur les oasis littorales voisines. La concordance entre les concentrations atmosphériques de fluorure d'hydrogène (HF), les gradients spatiaux issus de la modélisation AIRMOD et les teneurs élevées mesurées dans les végétaux atteste du rôle dominant des émissions industrielles comme source de contamination.

La prédominance des concentrations en fluor dans les tissus végétaux par rapport aux sols constitue un élément clé de discussion. Elle indique que la contamination s'effectue principalement par voie atmosphérique, via l'absorption foliaire directe du HF, plutôt que par une accumulation progressive dans le sol. Ce résultat est conforme aux travaux antérieurs montrant que le fluor est faiblement mobile dans le sol, mais rapidement assimilé par les feuilles sous forme gazeuse, entraînant des effets phytotoxiques rapides et sévères lorsque les seuils critiques sont dépassés.

Les niveaux mesurés dans les zones proches de la zone industrielle dépassent largement les seuils de phytotoxicité rapportés dans la littérature, ce qui explique la fréquence et l'intensité des symptômes observés sur le terrain, notamment les nécroses, le dessèchement des tissus et les pertes de rendement. Les cultures maraîchères et fourragères apparaissent particulièrement vulnérables, en raison de leur forte surface foliaire et de leur croissance rapide, tandis que les arbres fruitiers, bien que plus résistants physiologiquement, accumulent également des teneurs élevées en fluor, conduisant à des dommages irréversibles à moyen terme (Arnesen, 1997).

L'épisode aigu de pollution du 6 mai 2017 illustre la vulnérabilité extrême des systèmes agricoles oasiens face aux rejets industriels accidentels. Les concentrations exceptionnellement élevées mesurées dans la végétation, largement supérieures à celles du sol, constituent une signature caractéristique d'une exposition atmosphérique intense et brutale. Cet événement met en évidence le

caractère cumulatif de la pollution fluorée, dans laquelle les épisodes aigus s'ajoutent à une exposition chronique de fond.

Enfin, les résultats de l'enquête auprès des agriculteurs montrent que les impacts environnementaux se traduisent directement par une dégradation socio-économique des exploitations, marquée par une baisse durable des rendements, une perte de revenus et un abandon progressif des terres. Les mécanismes d'indemnisation existants, bien qu'ils reconnaissent partiellement les dommages subis, ne permettent pas de compenser la dégradation structurelle des systèmes agricoles. Ces constats soulignent la nécessité d'une gestion intégrée du risque industriel, combinant réduction des émissions à la source, surveillance environnementale renforcée et prise en compte effective des impacts agricoles dans les politiques de compensation.

Cependant, bien que le fluor soit reconnu comme l'un des polluants atmosphériques les plus phytotoxiques — sa toxicité étant estimée jusqu'à trois fois supérieure à celle d'autres polluants atmosphériques courants (Mezghani et al., 2005 ; Chakrabarti et Patra, 2015) — d'autres polluants peuvent également affecter les sols et la végétation. Des composés tels que le SO_2 et le NO_2 provoquent des symptômes similaires chez les plantes et contribuent à la dégradation des écosystèmes. Leur prise en compte est donc nécessaire afin de montrer que la contamination des sols et de la végétation résulte d'un enchevêtrement d'effets combinés entre plusieurs polluants atmosphériques.

Conclusion

Cette étude met en évidence l'empreinte environnementale majeure et durable de la pollution fluorée industrielle sur les agroécosystèmes oasiens littoraux de l'agglomération de Gabès. L'approche intégrée mobilisant mesures atmosphériques, analyses chimiques des sols et des végétaux, modélisation de la dispersion du fluorure d'hydrogène (HF) et enquêtes de terrain auprès des agriculteurs a permis de caractériser de manière fine les mécanismes de transfert, les gradients spatiaux de contamination et les impacts agroenvironnementaux associés.

Les résultats montrent que les émissions industrielles, dominées par le Groupe Chimique Tunisien, génèrent des concentrations atmosphériques de HF largement supérieures aux valeurs de référence internationales, avec une structuration spatiale fortement conditionnée par la proximité aux sources et les vents dominants. Cette pollution atmosphérique se traduit par des dépôts fluorés importants et une contamination marquée des compartiments biologiques, les teneurs foliaires dépassant largement celles mesurées dans les sols. Cette prédominance des concentrations dans les tissus végétaux constitue un indicateur robuste d'une contamination majoritairement d'origine atmosphérique, par absorption directe du HF, et explique la sévérité des symptômes de phytotoxicité observés sur les cultures.

Les épisodes aigus, tels que celui du 6 mai 2017, illustrent de manière emblématique la vulnérabilité extrême des systèmes agricoles oasiens face aux rejets industriels accidentels. Les concentrations exceptionnellement élevées mesurées dans la végétation, dépassant de plusieurs ordres de grandeur les seuils de phytotoxicité reconnus, confirment le lien direct entre les émissions fluorées et les dégâts agricoles observés. Ces événements s'inscrivent toutefois dans un contexte plus large de pollution chronique, dont les effets cumulatifs contribuent à une dégradation progressive des sols, à une régression durable des rendements et à une fragilisation structurelle des exploitations agricoles.

L'enquête auprès des agriculteurs met en lumière les dimensions socio-économiques de cette dégradation environnementale. La baisse des revenus agricoles, l'endettement, la diversification contrainte des sources de subsistance et l'abandon progressif des terres traduisent une perte de viabilité du système agricole oasien. Bien que les mécanismes

d'indemnisation mis en place par le GCT témoignent d'une reconnaissance partielle des préjudices subis, ils demeurent insuffisants, inégalement répartis dans l'espace et incapables de compenser les dommages structurels et cumulatifs induits par la pollution industrielle.

Dans son ensemble, cette étude confirme le rôle central de la pollution fluorée industrielle comme facteur structurant de la vulnérabilité agroenvironnementale dans les oasis littorales de Gabès. Elle souligne la nécessité urgente de renforcer les dispositifs de prévention et de réduction des émissions à la source, d'améliorer la surveillance environnementale par des réseaux de mesure transparents et harmonisés, et d'intégrer pleinement les dimensions agricoles et socio-économiques dans les politiques de gestion des risques industriels. À plus long terme, la préservation des oasis de Gabès, patrimoine écologique et socio-culturel unique en Méditerranée, passe par une réflexion globale sur la compatibilité entre développement industriel, sécurité environnementale et durabilité des systèmes agricoles côtiers.

Bibliographie :

A - Livres

1. **Bonte J.**, Étude de la pollution atmosphérique par les composés fluorés au voisinage des usines d'aluminium, Centre départemental d'études et de recherches sur l'environnement, section pollution atmosphérique, Lagor, France ; 1991.

B - Thèses et Mémoires

1. **Alaya F.**, Pollution industrielle à Gabès et vulnérabilités socioéconomiques, Master de recherche, Géographie (ou mention équivalente), FLSH-Sfax, Tunisie, 2019.
2. **Ben Amor A.**, Evaluation de la pollution atmosphérique du centre industriel Ghannouch (Gabès) sur quelques espèces végétales, Master de recherche, Sciences de l'environnement, [Université de Gabès/Sfax], Tunisie, 2014.
3. **Medhioub K.**, Impacts des rejets atmosphériques du complexe chimique de Gabès sur les parcelles agricoles de Chott Essalem, Bouchemma et Ghannouch, Rapport d'expertise (assimilé thèse/travail de recherche), [Université de Sfax], Tunisie, 2003.

C - Articles du Journal

1. **Arnesen AKM.**, Availability of fluoride to plants grown in contaminated soils, Plant Soil, Pays-Bas, Volume 191 et numéro 1 ; 1997.
2. **Bakiyaraj R, Ayyappan D.**, Air pollution tolerance index of some terrestrial plants around an industrial area, International Journal of Modern research and Reviews, Inde, Volume 2 et numéro 1 ; 2014.
3. **Baunthiyal M, Ranghar S.**, Accumulation of fluoride by plants: potential for phytoremediation, Clean–Soil, Air, Water, Allemagne, Volume 43 et numéro 1 ; 2015.
4. **Ben Abdallah F, Elloumi N, Mezghani I, Boukhris M, Garrec GP.**, Survival strategies of pomegranate and almond trees in a fluoride polluted area, Compte Rendus Biologies, France, Volume 329 et numéro 3 ; 2006.
5. **Chakrabarti S, Patra P.K.**, Biochemical and antioxidant responses of Paddy (*Oryza sativa* L.) to fluoride stress, Fluoride, Nouvelle-Zélande, Volume 48 et numéro 1 ; 2015.
6. **El Zrelli R, Courjault-Radé P, Rabaoui L, Castet S, Michel S, Bejaoui N.**, Heavy metal contamination and ecological risk assessment in the surface sediments of the coastal area

- surrounding the industrial complex of Gabes city, Gulf of Gabes, SE Tunisia, Marine pollution bulletin, Royaume-Uni, Volume 101 et numéro 2 ; 2015.
7. **Elloumi N, Zouari M, Mezghani M, Ben Abdallah F, Woodward S, Kallel M.**, Adaptive biochemical and physiological responses of *Eriobotrya japonica* to fluoride air pollution, *Ecotoxicology*, États-Unis, Volume 26 et numéro 7 ; 2017.
 8. **Kierdorf U, Kierdorf H.**, Fluoride concentrations in antler bone of roe deer (*Capreolus capreolus*) indicate decreasing fluoride pollution in an industrialized area of western Germany, *Environmental Toxicology and Chemistry*, États-Unis, Volume 20 et numéro 7 ; 2001.
 9. **Kierdorf U, Kierdorf H.**, Antlers as biomonitors of environmental pollution by lead and fluoride: A review, *European Journal of Wildlife Research*, Allemagne, Volume 51 et numéro 3 ; 2005.
 10. **Lohe R.N, Tyagi B, Singh V.**, Comparative study for Air Pollution Tolerance Index of some terrestrial plant species, *Global Journal of Environmental Science and Management*, Iran, Volume 1 et numéro 4 ; 2015.
 11. **Mezghani I, Elloumi N, Ben abdallah F, Boukhriss M.**, Fluoride accumulation by vegetation in the vicinity of a phosphate fertilizer plant in Tunisia, *Fluoride*, Nouvelle-Zélande, Volume 38 et numéro 1 ; 2005.
 12. **Taieb D, Ben Brahim A.**, Chemistry and mineralogy studies of PM10 atmospheric aerosols in the gulf of Gabès, south Tunisia, *International Journal of Energy Technology and Policy*, Suisse/Royaume-Uni, Volume 10 et numéro 2 ; 2016.
 13. **Tiwar S, Agrawal M, Marshal F.M.**, Evaluation of ambient air pollution impact on carrot plants at sub urban site using open top chambers, *Environmental Monitoring Assessment*, Pays-Bas, Volume 119 ; 2006.
 14. **Weerakkody U, Dover J.W, Mitchel P, Reiling K.**, Particulate matter pollution capture by leaves of seventeen living wall species with special reference to rail-traffic at a metropolitan station, *Urban Forestry and Urban greening*, Allemagne, Volume 27 ; 2017.
 15. **Weiss P, Offenthaler I, Ohlinger R, Wimmer J.**, Higher plants as accumulative bioindicators, *Trace metal - methodology of calculation for pollution assessment (minireview)*, Autriche, Volume 6 ; 2003.
 16. **Weissmannová H, Pavlovský J.**, Indices of soil contamination by heavy metals - methodology of calculation for pollution assessment (minireview), *Environmental Monitoring and Assessment*, Pays-Bas, Volume 189 et numéro 12 ; 2017.