



République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة زيان عاشور - الجلفة
Université Ziane Achour – Djelfa
كلية علوم الطبيعة و الحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
قسم العلوم البيولوجية
Département des Sciences Biologiques



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Ecologie et environnement

Spécialité : Ecologie végétale et environnement

Thème :

**Modelisation et mesures des impacts des gaz a effet de serre des sources AFOLU
(Agriculture, Forestry and Other Land Use) et procédures d'atténuation**

Présenté par :

ABIDLI Doua Takoua
ARBANE Meriem

Devant le jury composé de :

Président	NEDJIMI B.	Pr.
Promoteur	AZZOUZ M.	MCA
Examineur	SEHL B.	MCA
Examineur	OMRANI R.	MCA

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions **Allah** le Tout-Puissant, qui nous a donné la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous remercions notre encadreur, **Monsieur Azouz Mohamed**, pour son encadrement, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance et nos plus vifs remerciements à **M Mohamed Kacimi El Hassani**, qui nous a accompagnés avec une grande générosité tout au long de la période de réalisation de ce mémoire. Sa disponibilité de tous les instants, son écoute attentive, ses conseils avisés et ses remarques constructives nous ont été d'un soutien inestimable à chaque étape de notre travail. Sa rigueur scientifique, sa patience et ses encouragements constants nous ont permis de surmonter les difficultés rencontrées et ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire. Nous lui exprimons toute notre gratitude et notre profond respect pour son accompagnement précieux et son dévouement.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail :

- **Monsieur Nedjimi Bouzid**, Président du jury ;
- **Monsieur Sahel Boudjema**, Examineur ;
- **Monsieur Omrani**, Examineur.

Nous les remercions pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail ainsi que pour le temps qu'ils ont consacré à son évaluation.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, fruit de longues années d'effort et de patience...

À moi-même, qui ai persévéré, qui ai relevé tous les défis et qui n'ai jamais baissé les bras malgré les obstacles et les moments de doute. À cette force intérieure qui m'a portée jusqu'au bout de ce parcours.

À mes très chers parents, mon père et ma mère, qui n'ont cessé de me soutenir, de m'encourager et de croire en moi depuis toujours. Aucun mot ne pourra exprimer la profondeur de ma gratitude envers eux, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leurs prières qui m'ont accompagnée à chaque étape de ma vie. Que Dieu les protège et les garde auprès de moi.

À la prunelle de mes yeux, à tous mes espoirs et à ma plus grande source de motivation dans la vie, mes chers enfants **Nidhal, Mohamed et Yasser**. Vous avez été ma force lorsque je me sentais faible, mon sourire dans les moments difficiles, et la raison pour laquelle je n'ai jamais abandonné. Ce travail est aussi le vôtre, car chaque effort que j'ai fourni avait pour but de vous rendre fiers.

À toute personne qui m'a soutenue de près ou de loin,
qui est restée à mes côtés dans les moments faciles
comme dans les moments difficiles, qui m'a
encouragée par un mot, un geste ou simplement par
sa présence. Votre soutien a eu une valeur
inestimable et je vous en serai éternellement
reconnaissante.

À tous ceux qui croient que la persévérance et la
volonté peuvent surmonter toutes les difficultés.

Meriem Arbane

Au terme de ce travail de fin d'études je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire

Mes remerciements les plus respectueux s'adressent à Monsieur Kacimi Mohamed El Hassani pour son accompagnement ses précieux conseils sa disponibilité et son soutien tout au long de ce travail Son expérience et ses orientations ont été d'une grande importance pour l'aboutissement de cette étude

Je remercie également l'ensemble de mes professeurs qui ont assuré ma formation et qui m'ont transmis leurs connaissances avec sérieux et dévouement durant tout mon parcours universitaire

J'adresse une pensée particulière à mes chers parents pour leur amour leur patience leurs sacrifices et leur soutien permanent Leur confiance et leurs encouragements ont toujours été une source de motivation pour moi

Je tiens aussi à remercier mon mari pour son soutien sa présence son affection et ses encouragements qui m'ont accompagnée durant cette étape importante de ma vie Son appui moral m'a permis de persévérer et d'avancer avec confiance

À toutes les personnes qui ont participé à ma réussite de près ou de loin j'adresse mes plus sincères remerciements

Merci infiniment

ABIDLI Douaa

ملخص

تُعد ولاية الجلفة، المنطقة الرعوية الزراعية الأولى في الجزائر، حلقة وصل بين التل الزراعي والصحراء، حيث تشكل تربية الأغنام الرعوية الموسعة الركيزة الاجتماعية والاقتصادية المهيمنة، مع ضغط متزايد على النظم البيئية السهبية. تقوم هذه المذكرة بتقدير كمي لانبعاثات غازات الدفيئة من قطاع الزراعة والحراجة والاستخدامات الأخرى للأراضي (AFOLU) في الولاية على مدى 26 موسماً فلاحياً (1999/2000-2024/2025)، بتطبيق المبادئ التوجيهية للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (المستويين 1 و2) على فئات مصادر الثروة الحيوانية (التخمر المعوي، إدارة السماد، المراعي)، وتُستكمل بتحليل زمني-مكاني لتدهور الأراضي (LULUCF، 2005-2020) والغطاء النباتي السهبي (مؤشر NDVI الزمني، 2005-2025) باستخدام الاستشعار عن بعد عبر الأقمار الاصطناعية (لاندسات، موديس، سانتينال-5P، غوغل إيرث إنجن).

تمت مقارنة ثلاث مقاربات نمذجة لتفسير ديناميكية الانبعاثات: الانحدار الخطي المتعدد (OLS) المقرون بنموذج ARIMA، ونموذج غابة عشوائية أساسي (RF)، ونموذج غابة عشوائية مدعم بمتغيرات بيئية (NDVI، التساقطات، درجة حرارة سطح الأرض). أظهرت النتائج أن انبعاثات الثروة الحيوانية، التي يهيمن عليها التخمر المعوي للأغنام بنسبة تفوق 92\%، بلغت ذروتها عند 937,786 طن مكافئ ثاني أكسيد الكربون في موسم 2020/2021، ثم انخفضت بنسبة 51.2\% خلال جفاف 2021/2022. أنتج نموذج OLS استنساخاً شبه تام لمنهجية الهيئة الحكومية الدولية ($R^2 = 1.000$)، بينما كشف نموذج الغابة العشوائية أن أعداد الأغنام والماعز تفسر وحدها 53.8\% من تباين الانبعاثات، في حين تؤثر المتغيرات المناخية بشكل غير مباشر من خلال تأثيرها على ديناميكية القطيع. أظهرت حصيلة LULUCF تدهوراً صافياً للمسالك الرعوية السهبية لصالح التربة العارية (تحويل 129,378 هكتاراً بين 2005 و2020)، قابله جزئياً تخضير موضعي. توفر هذه النتائج قاعدة كمية غير مسبقة لتوجيه سياسات التخفيف والإدارة المستدامة للمراعي في المناطق شبه الجافة الرعوية الزراعية بالجزائر.

الكلمات المفتاحية:

الزراعة والحراجة والاستخدامات الأخرى للأراضي، تربية الأغنام، الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، استخدام الأراضي وتغيير استخدام الأراضي والحراجة، مؤشر الاختلاف الخضري الطبيعي، الاستشعار عن بعد، غابة عشوائية، الجلفة، الجزائر.

Résumé

La Wilaya de Djelfa, première région agropastorale d’Algérie, occupe une position charnière entre le Tell agricole et le Sahara, où l’élevage ovin extensif constitue le pilier socio-économique dominant tout en exerçant une pression croissante sur les écosystèmes steppiques. Ce mémoire quantifie les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur AFOLU (Agriculture, Foresterie et Autres Affectations des Terres) de la wilaya sur 26 campagnes agricoles (1999/2000-2024/2025), en appliquant les Lignes directrices du GIEC (Tier 1 et Tier 2) aux catégories sources de l’élevage (fermentation entérique, gestion du fumier, pâturages), et les complète par une analyse spatio-temporelle de la dégradation des terres (LULUCF, 2005–2020) et du couvert végétal steppique (NDVI diachronique, 2005–2025) par télédétection satellitaire (Landsat, MODIS, Sentinel-5P, Google Earth Engine).

Trois approches de modélisation sont comparées pour expliquer la dynamique des émissions : la régression linéaire multiple (OLS) couplée à un modèle ARIMA, un modèle Random Forest (RF) de base, et un modèle RF enrichi de variables environnementales (NDVI, précipitations, température de surface). Les résultats montrent que les émissions de l’élevage, dominées à plus de 92 % par la fermentation entérique ovine, ont culminé à 937 786 tCO₂e en 2020/2021 avant de chuter de 51,2 % lors de la sécheresse de 2021/2022. Le modèle OLS reproduit la méthodologie GIEC de façon quasi parfaite ($R^2 = 1,000$), tandis que le Random Forest révèle que les effectifs ovins et caprins expliquent à eux seuls 53,8 % de la variance des émissions, les variables climatiques agissant de manière indirecte par leur effet sur la dynamique du cheptel. Le bilan LULUCF révèle une dégradation nette des parcours steppiques au profit du sol nu (129 378 ha convertis entre 2005 et 2020), partiellement compensée par un reverdissement localisé. Ces résultats fournissent une base quantitative inédite pour orienter les politiques d’atténuation et de gestion durable des parcours dans les zones agropastorales semi-arides algériennes.

Mots-clés : AFOLU, gaz à effet de serre, élevage ovin, GIEC, LULUCF, NDVI, télédétection, Random Forest, Djelfa, Algérie.

Abstract

The Djelfa Province, Algeria's leading agropastoral region, sits at the hinge between the agricultural Tell and the Sahara, where extensive sheep farming is both the dominant socio-economic pillar and a growing source of pressure on steppe ecosystems. This thesis quantifies greenhouse gas (GHG) emissions from the province's AFOLU sector (Agriculture, Forestry and Other Land Use) over 26 agricultural campaigns (1999/2000-2024/2025), applying IPCC Guidelines (Tier 1 and Tier 2) to livestock emission source categories (enteric fermentation, manure management, pasture emissions), complemented by a spatio-temporal analysis of land degradation (LULUCF, 2005–2020) and steppe vegetation cover (diachronic NDVI, 2005–2025) using satellite remote sensing (Landsat, MODIS, Sentinel-5P, Google Earth Engine).

Three modelling approaches are compared to explain emission dynamics : multiple linear regression (OLS) combined with an ARIMA model, a baseline Random Forest (RF) model, and an RF model enriched with environmental variables (NDVI, precipitation, land surface temperature). Results show that livestock emissions, over 92 % driven by sheep enteric fermentation, peaked at 937,786 tCO₂e in 2020/2021 before falling 51.2 % during the 2021/2022 drought. The OLS model reproduces the IPCC methodology almost perfectly ($R^2 = 1.000$), while Random Forest reveals that sheep and goat headcounts alone explain 53.8 % of emission variance, with climate variables acting indirectly through their effect on herd dynamics. The LULUCF balance reveals net degradation of steppe rangelands in favour of bare soil (129,378 ha converted between 2005 and 2020), partially offset by localized greening. These results provide a novel quantitative basis for guiding mitigation policy and sustainable rangeland management in Algeria's semi-arid agropastoral areas.

Keywords : AFOLU, greenhouse gases, sheep farming, IPCC, LULUCF, NDVI, remote sensing, Random Forest, Djelfa, Algeria.

Table des matières

Résumé	1
Abstract	2
Liste des abréviations	9
1 Introduction	10
1.1 Contexte général	10
1.2 Le secteur AFOLU et le cas de l'Algérie	11
1.3 Problématique	11
1.4 Objectifs de l'étude	12
1.5 Plan du mémoire	13
2 Partie théorique	14
2.1 Notions fondamentales sur les gaz à effet de serre	14
2.1.1 Définition et mécanisme de l'effet de serre	14
2.1.2 Types et composition des gaz à effet de serre	15
2.2 Sources d'émissions de gaz à effet de serre	17
2.3 Effets et conséquences des émissions de gaz à effet de serre	19
2.3.1 Réchauffement climatique et effets sur le climat	19
2.3.2 Phénomènes météorologiques extrêmes	19
2.3.3 Élévation du niveau de la mer et impacts sur la biodiversité	20
2.4 Stratégies et technologies d'atténuation	20
2.4.1 Technologies de capture et de stockage du carbone	21
2.4.2 Stratégies d'atténuation dans le secteur agricole	21
2.5 Cas de l'Algérie	22
2.5.1 Niveaux et tendances actuels des émissions	22
2.5.2 Sources et contributions sectorielles	23
2.5.3 Impacts du changement climatique et vulnérabilités	24
2.6 Cadre conceptuel de la réglementation mondiale des émissions	25
2.6.1 Systèmes de plafonnement et d'échange (Cap-and-Trade)	26

3	Matériel et Méthodes	28
3.1	Zone d'étude	28
3.1.1	Présentation générale	28
3.1.2	Relief, géologie et pédologie	29
3.1.3	Occupation du sol et ressources agropastorales	29
3.1.4	Patrimoine forestier	30
3.2	Période de référence	31
3.3	Sources des données d'activité	31
3.4	Quantification des émissions du secteur de l'élevage	31
3.4.1	Catégories sources inventoriées	31
3.4.2	Facteurs d'émission utilisés	32
3.4.3	Potentiel de Réchauffement Global appliqué	32
3.4.4	Équations de calcul	32
3.5	Analyse spatiale par télédétection	33
3.5.1	NDVI diachronique	33
3.5.2	Cartographie des concentrations atmosphériques	33
3.5.3	Volet LULUCF	34
3.6	Approches de modélisation	34
3.7	Traitement des données	35
3.8	Limites méthodologiques et gestion des incertitudes	35
4	Résultats	36
4.1	Évolution des effectifs animaux (1999/2000 – 2024/2025)	36
4.2	Émissions de GES par catégorie source	37
4.3	Dynamique du couvert végétal steppique (NDVI diachronique 2005–2025)	38
4.4	Occupation du sol	40
4.5	Concentrations atmosphériques de méthane et stock de carbone	41
4.6	Carte des précipitations annuelles	42
4.7	Bilan LULUCF (2005–2020)	43
4.8	Performance comparative des modèles	44
5	Discussion	47
5.1	Déterminants structurels des émissions et architecture en deux étapes	47
5.2	Cohérence spatiale entre pression pastorale, dégradation et émissions	48
5.3	Intégration du bilan LULUCF	48
5.4	Limites et perspectives	49
	Conclusion générale	50

A	Annexes	56
A.1	Annexe A : Script Google Earth Engine (GEE)	56
A.2	Annexe B : Script Python pour le traitement des données et le bilan LULUCF	59
A.3	Annexe C : Facteurs de stock de carbone détaillés	61
A.4	Annexe D : Structure des données brutes (effectifs animaux)	62

Table des figures

2.1	Mécanisme de l'effet de serre naturel et anthropique	15
2.2	Répartition mondiale des émissions de gaz à effet de serre par type de gaz .	17
2.3	Répartition sectorielle des émissions mondiales de gaz à effet de serre . . .	18
2.4	Évolution historique des émissions mondiales de GES (1970-2019)	19
2.5	Évolution de la température moyenne mondiale (Anomalies thermiques) . .	20
2.6	Schéma de principe du Captage et Stockage du Carbone (CSC)	21
2.7	Principales stratégies d'atténuation des GES dans le secteur agricole	22
2.8	Évolution des émissions de CO ₂ en Algérie (1971-2020)	23
2.9	Répartition sectorielle des émissions de GES en Algérie	24
2.10	Carte de la vulnérabilité climatique et de la baisse des précipitations en Algérie	25
2.11	Frise chronologique des accords internationaux sur le climat	26
2.12	Fonctionnement du système de plafonnement et d'échange (Marché du car- bone)	27
3.1	Localisation schématique de la Wilaya de Djelfa, à la charnière entre le Tell, la Steppe (Hauts Plateaux) et le Sahara	29
4.1	Évolution des effectifs animaux (ovins, caprins, bovins) et des émissions GES totales de l'élevage, Wilaya de Djelfa, campagnes 1999/2000–2022/2023	37
4.2	Décomposition des émissions GES de l'élevage par catégorie source GIEC (3.A Fermentation entérique, 3.B Gestion du fumier, 3.D Pâturages), Wi- laya de Djelfa, 1999/2000–2022/2023	38
4.3	Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) de la Wilaya de Djelfa, composite printanier 2025	39
4.4	Carte de changement diachronique du NDVI ($\Delta\text{NDVI} = \text{NDVI}_{2025} - \text{NDVI}_{2005}$) superposée au fond satellite ; les teintes bleues indiquent une stabilité à un léger reverdissement, les teintes rouges une dégradation localisée du couvert végétal	40

4.5	Occupation du sol de la Wilaya de Djelfa : zones bâties et mises en valeur agricole (jaune), plans d'eau (bleu foncé) et matrice steppique dominante (gris)	41
4.6	Concentrations atmosphériques moyennes de méthane (CH_4) au-dessus de la Wilaya de Djelfa, composite annuel 2025	42
4.7	Précipitations annuelles moyennes (ERA5-Land) sur la Wilaya de Djelfa .	43
4.8	Bilan net de carbone (LULUCF) par transition d'occupation des sols, Wilaya de Djelfa, 2005–2020	44
4.9	Importance des variables par permutation – modèle Random Forest de base (gauche) et modèle Tier 2 enrichi de variables environnementales (droite) .	46

Liste des tableaux

3.1	Répartition de la superficie agricole de la Wilaya de Djelfa	30
3.2	Répartition du patrimoine forestier de la Wilaya de Djelfa	30
3.3	Sources des données d'activité utilisées dans l'étude	31
3.4	Facteurs d'émission utilisés pour l'inventaire GES de l'élevage (Source : GIEC 2006, Tier 1 et Tier 2)	32
3.5	Stocks de carbone totaux par classe d'occupation du sol (tC/ha)	34
4.1	Matrice de transition et bilan carbone LULUCF (2005–2020)	44
4.2	Synthèse comparative des performances des modèles de modélisation	45
A.1	Stocks de carbone détaillés par classe (tC/ha)	61
A.2	Extrait des effectifs animaux par campagne agricole (têtes)	62

Liste des abréviations

AFOLU	Agriculture, Foresterie et Autres Affectations des Terres
AGB / BGB	Biomasse aérienne / souterraine (<i>Above/Below-Ground Biomass</i>)
ARIMA	Modèle autorégressif intégré à moyenne mobile
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CSC / CCUS	Captage et Stockage du Carbone
DA / FE	Données d'Activité / Facteur d'Émission
DSA	Direction des Services Agricoles
ERA5	Réanalyse atmosphérique ECMWF (5 ^e génération)
GEE	Google Earth Engine
GES / GHG	Gaz à Effet de Serre
GIEC / IPCC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GWP / PRG	Potentiel de Réchauffement Global
LOO	Validation croisée Leave-One-Out
LST	Température de Surface (<i>Land Surface Temperature</i>)
LULC / LULUCF	Occupation des sols / Utilisation des terres, changement d'affectation et foresterie
MAPE / RMSE	Erreur absolue moyenne en % / Racine de l'erreur quadratique moyenne
MDP	Mécanisme de Développement Propre
NDVI	Indice de Végétation par Différence Normalisée
OLS	Régression linéaire par Moindres Carrés Ordinaires
RF	Random Forest (forêt aléatoire)
SAT / SAU	Superficie Agricole Totale / Utile
TROPOMI	Instrument embarqué sur Sentinel-5P (mesure de gaz atmosphériques)

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte général

Les gaz à effet de serre sont des composés d'origine naturelle et anthropique présents dans l'atmosphère terrestre qui absorbent et retiennent l'énergie thermique du soleil grâce à un processus appelé effet de serre. Cet effet naturel est essentiel à la vie sur Terre, car il maintient notre planète à une température supérieure d'environ 33 °C à ce qu'elle serait sans ces gaz. Depuis la révolution industrielle, les activités humaines ont toutefois considérablement augmenté les concentrations atmosphériques de ces gaz : le dioxyde de carbone (CO_2) en représente environ 76 %, le méthane (CH_4) 16 %, l'oxyde nitreux (N_2O) 6 % et les gaz fluorés 2 % [50, 33].

Le CO_2 se distingue comme le gaz le plus important en raison de sa concentration excessive (environ 414 ppm en 2021, soit une hausse de 100 ppm depuis 1958), provenant à la fois de processus naturels et de sources anthropiques telles que la combustion de combustibles fossiles, la déforestation et l'industrie [37, 13, 52]. Le méthane, deuxième gaz à effet de serre anthropique le plus important, possède un potentiel de réchauffement global 28 fois supérieur à celui du CO_2 malgré une durée de vie atmosphérique plus courte [52, 47, 5], et provient principalement de la fermentation entérique du bétail, des rizières et de l'exploitation des combustibles fossiles [5, 13]. L'oxyde nitreux, avec un potentiel de réchauffement global de 273, provient surtout de l'épandage d'engrais et des activités agricoles [53, 52].

Les sources agricoles représentent globalement 30 % des émissions anthropiques totales, l'élevage seul étant responsable de 14,5 % des émissions mondiales – un ordre de grandeur comparable à celui du secteur des transports [5, 49, 25]. La fermentation entérique des ruminants contribue à elle seule à plus de 90 % des émissions de méthane du bétail [5, 49]. Cette accumulation de GES intensifie le réchauffement climatique : les concentrations de CO_2 sont passées d'environ 280 ppm avant 1800 à 420,99 ppm en 2022 [1], entraînant une hausse des températures mondiales de 0,5 à 1,0 °C sur le dernier siècle [53], une multipli-

cation des phénomènes météorologiques extrêmes [2, 24, 45] et des impacts profonds sur les écosystèmes et la biodiversité [32, 30].

Face à ce constat, la communauté internationale a développé des stratégies d'atténuation technologiques (capture et stockage du carbone, énergies renouvelables) et fondées sur la nature (restauration forestière, gestion durable des terres et de l'élevage) [37, 19, 17, 4, 8], ainsi qu'un cadre réglementaire international structuré autour de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC, 1992), du Protocole de Kyoto (1997) et de l'Accord de Paris (2015), qui vise à limiter le réchauffement à 1,5–2 °C par rapport aux niveaux préindustriels [34, 23, 41, 48, 18].

1.2 Le secteur AFOLU et le cas de l'Algérie

Le secteur AFOLU (*Agriculture, Forestry and Other Land Use*) regroupe les émissions et absorptions de GES liées à l'agriculture, à l'élevage, à la foresterie et aux changements d'affectation des terres. Il occupe une place particulière dans les inventaires nationaux car il combine à la fois des sources d'émissions (fermentation entérique, gestion des déjections, dégradation des terres) et des puits de carbone (forêts, sols, biomasse), rendant son bilan net sensible aux pratiques de gestion des terres et du cheptel.

En Algérie, les émissions de CO₂ ont été multipliées par plus de sept entre 1971 et 2020 (de 22,3 à 163,5 millions de tonnes), plaçant le pays au troisième rang des plus gros émetteurs d'Afrique [9, 10]. Si le secteur de l'énergie domine le bilan national [29, 35], les émissions agricoles combinées ont progressé de 56 % entre 1980 et 2016 [22], et le secteur pétrolier et gazier génère à lui seul environ 0,89 téragramme de méthane par an [31]. Sur le plan climatique, l'Algérie fait partie des régions méditerranéennes les plus exposées au changement climatique, avec une baisse des précipitations annuelles d'environ 30 % au cours des dernières décennies [10, 57, 21] et une dégradation forestière nord-africaine de plus de 6,3 millions d'hectares entre 2000 et 2010 [28]. Dans le cadre de l'Accord de Paris, l'Algérie s'est engagée à réduire ses émissions de GES de 7 % d'ici 2030 par ses propres moyens, objectif pouvant atteindre 22 % avec un soutien international [20, 10].

1.3 Problématique

C'est dans ce contexte national que s'inscrit la présente étude, centrée sur la Wilaya de Djelfa. Véritable capitale agropastorale de l'Algérie, cette wilaya abrite le cheptel ovin le plus important du pays et occupe une position de charnière écologique entre le Tell agricole du nord et le Sahara au sud (cf. Chapitre 3). Or cette vocation pastorale repose presque entièrement sur l'exploitation des parcours steppiques – 84,52 % de la Superficie Agricole Totale de la wilaya – dont la capacité de charge est directement tributaire d'une pluviométrie faible et irrégulière (200 à 350 mm/an).

Cette configuration place la wilaya devant une tension structurelle difficile à arbitrer : d’une part, l’élevage extensif ovin constitue le principal moteur économique et le mode de vie traditionnel d’une large part de la population rurale ; d’autre part, la pression continue du pâturage sur des écosystèmes déjà fragilisés par l’aridité accroît le risque de dégradation des terres, de perte de biomasse végétale et, in fine, d’émissions de GES supplémentaires liées à la fois au cheptel et à la dynamique du couvert végétal. Cette tension est encore renforcée par la vulnérabilité de la région aux sécheresses récurrentes, dont les effets sur les effectifs animaux – et donc sur les émissions – demeurent mal quantifiés à l’échelle locale.

À ce jour, aucun inventaire territorialisé et multi-décennal des émissions de GES du secteur AFOLU n’a été établi pour la Wilaya de Djelfa, et le lien entre dynamique pastorale, dégradation des parcours et émissions de carbone n’y a jamais été modélisé de façon intégrée. Cette lacune empêche toute évaluation chiffrée des marges de manuvre disponibles pour concilier maintien de l’activité pastorale et atténuation des émissions.

La problématique de cette étude peut donc être formulée ainsi : **quelle est l’ampleur et quelle est la dynamique des émissions de GES du secteur AFOLU de la Wilaya de Djelfa sur les 26 dernières années, et dans quelle mesure les facteurs climatiques et la dynamique du couvert végétal steppique permettent-ils d’expliquer et d’anticiper cette trajectoire d’émissions ?** Plus largement, comment concilier le développement socio-économique fondé sur l’élevage extensif avec la préservation des écosystèmes steppiques et l’atténuation des émissions de carbone ?

1.4 Objectifs de l’étude

Pour répondre à cette problématique, la présente étude poursuit trois objectifs principaux :

1. Évaluer de manière exhaustive les émissions de GES (CH_4 et N_2O) issues du sous-secteur de l’élevage sur une période de 26 ans (1999/2000–2024/2025), en appliquant les Lignes directrices du GIEC (Tier 1 et Tier 2) ;
2. Analyser la dynamique spatio-temporelle du couvert végétal par télédétection (NDVI) sur une période de 20 ans (2005–2025), afin de cartographier la dégradation ou le reverdissement des parcours steppiques, et quantifier le bilan net des terres (LU-LUCF) ;
3. Modéliser la relation entre pressions agropastorales, facteurs climatiques et émissions de GES à l’aide de trois approches complémentaires (régression OLS/ARIMA, Random Forest de base, Random Forest enrichi de variables environnementales), afin d’identifier les déterminants structurels des émissions et de proposer des pistes d’atténuation ciblées.

1.5 Plan du mémoire

Ce mémoire est structuré selon une logique IMRAD, complétée par un chapitre de revue de littérature. Le Chapitre 2 (Partie théorique) développe les fondements scientifiques mobilisés : nature et sources des gaz à effet de serre, effets sur le système climatique, stratégies et cadre réglementaire international d'atténuation, et situation spécifique de l'Algérie. Le Chapitre 3 (Matériel et Méthodes) présente la zone d'étude ainsi que les sources de données, les méthodes d'inventaire GES (GIEC) et les méthodes de télédétection (NDVI, LULUCF, Sentinel-5P) mobilisées. Le Chapitre 4 (Résultats) expose l'ensemble des résultats obtenus : trajectoire des effectifs et des émissions, cartographies satellitaires, bilan LULUCF et performances comparées des modèles. Le Chapitre 5 (Discussion) interprète ces résultats, en discute la portée et les limites, et propose une architecture de modélisation en deux étapes ainsi que des pistes d'atténuation. Une conclusion générale clôt le mémoire en synthétisant les apports de l'étude et ses perspectives.

Chapitre 2

Partie théorique

Ce chapitre développe en détail les fondements scientifiques mobilisés tout au long de ce mémoire : la nature et les sources des gaz à effet de serre, leurs effets sur le système climatique, les stratégies et le cadre réglementaire international d'atténuation, ainsi que la situation spécifique de l'Algérie. Il complète la synthèse introductive du Chapitre 1 en fournissant les bases conceptuelles nécessaires à la compréhension des choix méthodologiques exposés au Chapitre 3.

2.1 Notions fondamentales sur les gaz à effet de serre

2.1.1 Définition et mécanisme de l'effet de serre

Les gaz à effet de serre sont des composés d'origine naturelle et anthropique présents dans l'atmosphère terrestre qui absorbent et retiennent l'énergie thermique du soleil grâce à un processus appelé l'effet de serre (Figure 2.1). Ces gaz laissent passer la lumière du soleil à travers l'atmosphère, mais empêchent une partie de la chaleur que la Terre renvoie vers l'espace de s'échapper, à l'instar du fonctionnement des vitres d'une serre. Cet effet de serre naturel est essentiel à la vie sur Terre, car il maintient notre planète à une température supérieure d'environ 33 °C à ce qu'elle serait sans ces gaz, la rendant ainsi habitable.

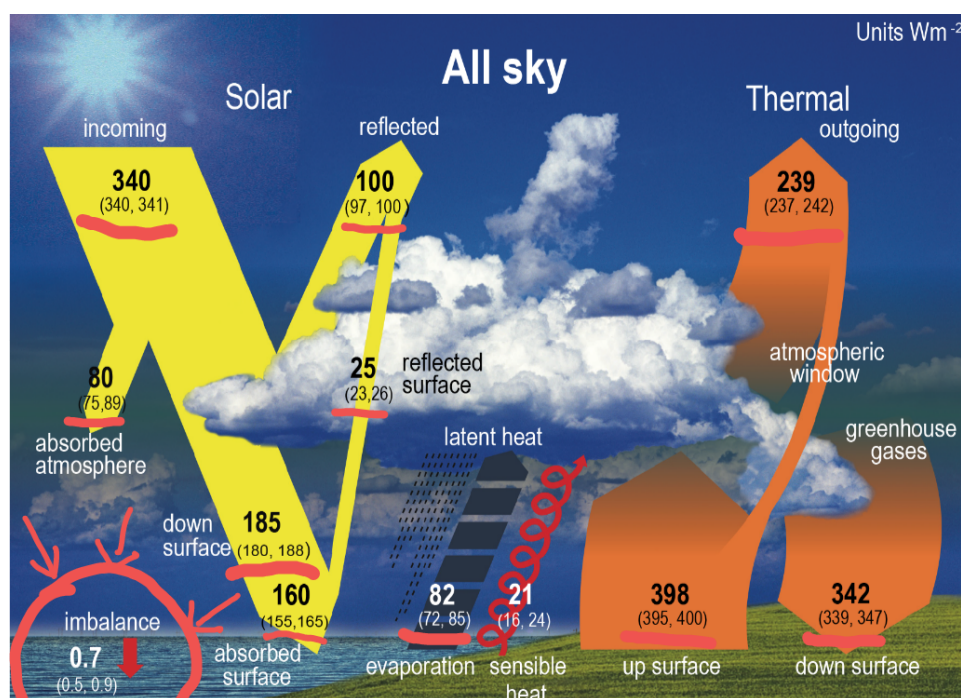


FIGURE 2.1 : Mécanisme de l'effet de serre naturel et anthropique

Source : GIEC, Rapport AR6 (Groupe de travail I), 2021

2.1.2 Types et composition des gaz à effet de serre

Cependant, les activités humaines depuis la révolution industrielle ont considérablement augmenté les concentrations de gaz à effet de serre. Comme l'illustre la Figure 2.2, les principaux gaz à effet de serre comprennent le dioxyde de carbone (CO_2), qui représente environ 76 %, le méthane (CH_4) à 16 %, l'oxyde nitreux (N_2O) à 6 % et les gaz fluorés à 2 %. Chaque gaz possède des propriétés différentes en termes de quantité de chaleur qu'il peut piéger (potentiel de réchauffement global) et de durée de séjour dans l'atmosphère : le CO_2 y reste pendant des centaines d'années, tandis que le méthane se décompose en une dizaine d'années mais piège beaucoup plus de chaleur par molécule.

Les gaz à effet de serre se caractérisent par leur structure moléculaire, qui leur permet d'absorber et de réémettre le rayonnement infrarouge tout en restant transparents à la lumière visible [50, 33]. Les principaux gaz à effet de serre peuvent être classés en composés naturels et composés synthétiques, chacun contribuant différemment à l'effet de réchauffement global.

Le dioxyde de carbone (CO_2) se distingue comme le gaz à effet de serre le plus important en raison de sa concentration excessive dans l'atmosphère par rapport aux autres, avec des concentrations atmosphériques atteignant environ 414 ppm en 2021, soit une augmentation de 100 ppm depuis 1958 [37]. Le CO_2 provient à la fois de processus naturels, tels que la respiration des plantes et des animaux, et de sources anthropiques, notamment la combustion de combustibles fossiles, la déforestation et les processus industriels comme

la production de ciment [13, 52, 32]. Le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre ayant la plus longue durée de vie dans l'atmosphère, ce qui entraîne son accumulation constante [33].

Le méthane (CH_4) est le deuxième gaz à effet de serre d'origine anthropique le plus important, tant en termes de potentiel de réchauffement global que de quantité [5, 11]. Bien que sa durée de vie atmosphérique soit plus courte (environ 12 ans) que celle du CO_2 , le méthane a un potentiel de réchauffement global 28 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone [52, 47]. Selon des évaluations récentes, le méthane d'origine non fossile présente un potentiel de réchauffement global de 79,7 sur 20 ans et de 27,0 sur 100 ans [53]. Le méthane provient principalement de la fermentation entérique du bétail, des rizières, de la production de pétrole et de gaz, de l'exploitation minière du charbon, de la décomposition des déchets organiques dans les décharges et d'autres pratiques agricoles [5, 13].

L'oxyde nitreux (N_2O) est un autre gaz à effet de serre important, avec un potentiel de réchauffement global de 273 sur des horizons de 20 et 100 ans [53]. Ce gaz provient principalement de l'épandage d'engrais, des émissions de gaz résiduels industriels et de diverses activités agricoles [52, 13].

Les gaz fluorés constituent un groupe de composés synthétiques comprenant les perfluorocarbures (PFC), les hydrofluorocarbures (HFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6) [37, 5]. Ces gaz sont entièrement d'origine anthropique et, bien qu'ils soient émis en quantités relativement faibles, constituent des gaz à fort potentiel de réchauffement global en raison de leur puissance [13]. Les chlorofluorocarbures (CFC), bien qu'ils aient joué un rôle historique important, sont aujourd'hui largement interdits en vertu du Protocole de Montréal [44].

Parmi les autres gaz à effet de serre, on trouve la vapeur d'eau, qui est le gaz à effet de serre le plus abondant mais qui est régulée naturellement et n'est pas facilement influencée par les activités humaines, et l'ozone, qui agit comme un gaz à effet de serre dans l'atmosphère bien qu'il soit nocif à la surface de la Terre [52]. Les processus d'industrialisation et d'urbanisation ont considérablement amplifié les concentrations de gaz naturels et anthropiques dans l'atmosphère terrestre au cours des dernières décennies [13].

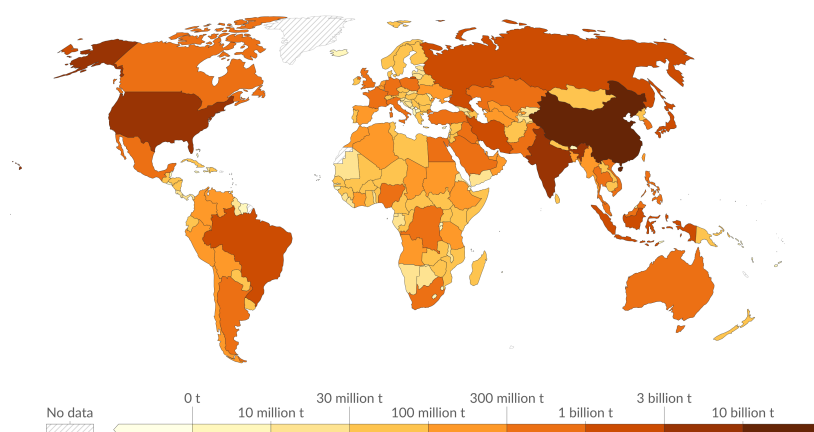


FIGURE 2.2 : Répartition mondiale des émissions de gaz à effet de serre par type de gaz

Source : *Our World in Data*, d'après *Climate Watch*, 2023

2.2 Sources d'émissions de gaz à effet de serre

Les émissions de gaz à effet de serre proviennent à la fois de sources naturelles et anthropiques, bien que les activités humaines soient devenues le principal facteur à l'origine des concentrations atmosphériques depuis la révolution industrielle [50, 56]. Les sources naturelles comprennent les éruptions volcaniques, la respiration des plantes et des animaux, l'évaporation océanique et la décomposition de la matière organique, mais celles-ci jouent désormais un rôle secondaire par rapport aux émissions d'origine humaine [33, 56].

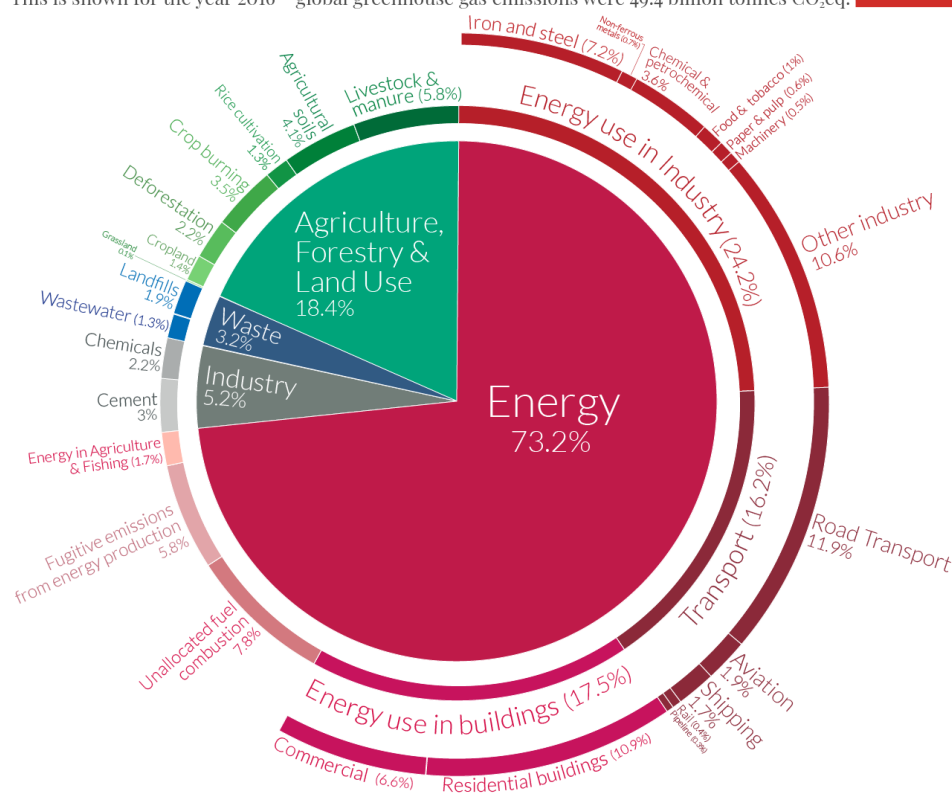
Les systèmes énergétiques et la combustion de combustibles fossiles constituent la principale source d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale. La combustion de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel pour la production d'énergie, les transports, l'industrie manufacturière, le bâtiment et les processus industriels représente environ 68 % des émissions de CO₂ [19]. Le charbon est responsable de 46 % des émissions de CO₂ d'origine fossile, suivi du pétrole avec 35 % et du gaz naturel avec 15 % [6]. Les activités industrielles, notamment les centrales thermoélectriques et divers processus de fabrication, contribuent de manière significative à ces émissions [50].

Les sources agricoles constituent un facteur majeur des émissions de gaz à effet de serre, représentant environ 30 % du total des émissions anthropiques, y compris les émissions indirectes liées au changement d'affectation des sols [5, 49]. L'élevage est responsable de 14,5 % des émissions mondiales, soit environ l'équivalent du secteur des transports [5, 25]. La fermentation entérique des ruminants contribue à plus de 90 % des émissions de méthane provenant du bétail et représente 40 % des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole [5, 49]. La culture du riz constitue une autre source agricole importante, responsable d'environ 30 % de l'ensemble des émissions de méthane [3].

Global greenhouse gas emissions by sector

This is shown for the year 2016 – global greenhouse gas emissions were 49.4 billion tonnes CO₂eq.

Our World
in Data



OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020).

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie (2020).

FIGURE 2.3 : Répartition sectorielle des émissions mondiales de gaz à effet de serre

Source : Our World in Data, 2023

L'augmentation spectaculaire des émissions est mise en évidence par des données récentes indiquant que les émissions mondiales ont atteint un niveau record de 52,4 gigatonnes d'équivalent CO₂ en 2019, le CO₂ d'origine fossile s'élevant à 38,0 gigatonnes [55]. Cela représente une augmentation de 78 % des émissions totales de gaz à effet de serre depuis 1970, principalement due à une augmentation de 90 % des émissions de CO₂ [40] (Figure 2.4).

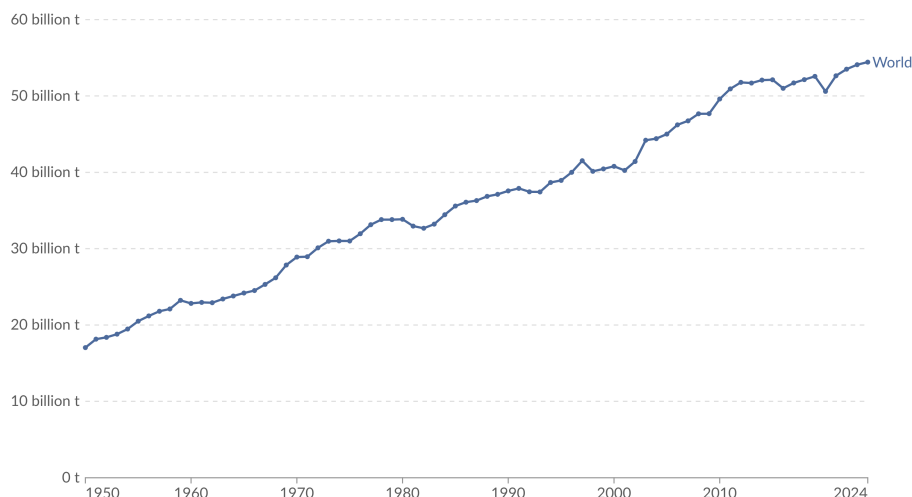


FIGURE 2.4 : Évolution historique des émissions mondiales de GES (1970-2019)

Source : Global Carbon Project, 2022

2.3 Effets et conséquences des émissions de gaz à effet de serre

Les émissions de gaz à effet de serre ont des conséquences environnementales et socio-économiques de grande ampleur en raison de leur rôle dans le réchauffement climatique et le changement climatique [50, 2]. L'accumulation de ces gaz dans l'atmosphère permet une plus grande absorption du rayonnement infrarouge du spectre électromagnétique, intensifiant l'effet de serre naturel et provoquant des changements significatifs dans le climat terrestre [50, 44].

2.3.1 Réchauffement climatique et effets sur le climat

Le principal impact de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre est le réchauffement climatique (Figure 2.5). Les concentrations atmosphériques de CO_2 étant passées d'environ 280 ppm dans les années 1800 à 420,99 ppm en 2022 [1], cela a entraîné une hausse des températures mondiales d'environ 0,5 à 1,0 °C au cours du siècle dernier [53]. Le forçage radiatif des trois principaux gaz à effet de serre a atteint 2,8 en 2019, soit une augmentation de 48,5 % par rapport aux niveaux de 1990 [55].

2.3.2 Phénomènes météorologiques extrêmes

Le changement climatique a entraîné une augmentation de la fréquence et de la gravité des phénomènes météorologiques extrêmes, notamment les vagues de chaleur, les sécheresses, les ouragans et les inondations [2, 24]. Ces changements se manifestent par des

sécheresses, des vagues de chaleur, des inondations et des conditions de stress dû au gel irrégulières à l'échelle locale et régionale [2]. Les gaz à effet de serre contribuent à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes, ce qui peut aggraver la pollution atmosphérique par le biais d'émissions secondaires accrues, telles que l'ozone troposphérique et les particules fines [45].

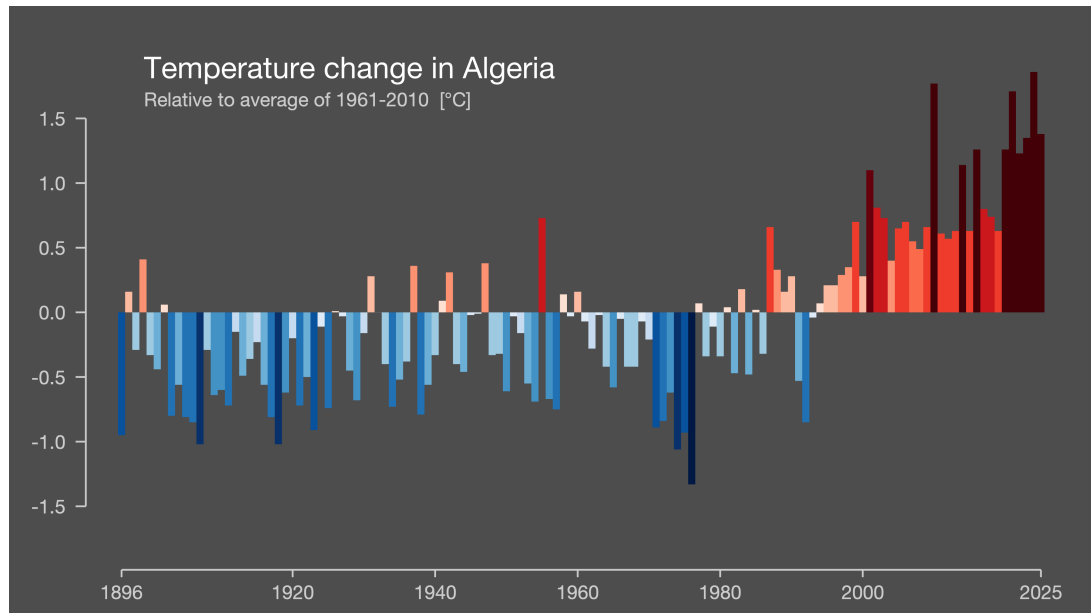


FIGURE 2.5 : Évolution de la température moyenne mondiale (Anomalies thermiques)

Source : Ed Hawkins, Université de Reading (ShowYourStripes), 2023

2.3.3 Élévation du niveau de la mer et impacts sur la biodiversité

L'un des impacts les plus visibles est la fonte accélérée des calottes polaires et des glaciers à mesure que les températures mondiales augmentent [56, 30]. Cette fonte contribue à l'élévation du niveau de la mer, ce qui représente une menace importante pour les communautés côtières [56, 44]. La perturbation de l'équilibre des gaz atmosphériques a des effets profonds sur les écosystèmes et les processus naturels qui soutiennent la vie sur Terre [32]. Ces impacts comprennent des modifications de la disponibilité des ressources en eau, l'extinction d'espèces et des changements significatifs dans les écosystèmes [32, 30].

2.4 Stratégies et technologies d'atténuation

La lutte contre les émissions de gaz à effet de serre nécessite des réductions immédiates, rapides et à grande échelle afin de limiter le réchauffement à 1,5 °C, voire à 2 °C [37].

2.4.1 Technologies de capture et de stockage du carbone

La capture et le stockage du carbone (CSC) constituent l'une des technologies les plus efficaces pour atténuer le réchauffement climatique (Figure 2.6). Il s'agit actuellement de la seule technologie permettant de continuer à utiliser les combustibles fossiles tout en réduisant les émissions de CO_2 dans l'atmosphère [37]. La capture, l'utilisation et le stockage du carbone (CCUS) recourt à quatre méthodes principales avec la capacité de capturer jusqu'à 95 % du dioxyde de carbone produit dans les centrales électriques en service [1].

Le recours aux sources d'énergie renouvelables constitue l'une des solutions les plus viables pour réduire les émissions de CO_2 tout en maintenant la croissance économique [19]. Les technologies énergétiques propres et modernes, notamment l'énergie solaire, éolienne, la biomasse, l'hydroélectricité et la géothermie, offrent des moyens efficaces de réduire les émissions de carbone [43]. Les solutions climatiques naturelles offrent un potentiel d'atténuation considérable [17, 43]. La restauration forestière mondiale constitue l'une des solutions les plus efficaces, avec un potentiel de 0,9 milliard d'hectares supplémentaires de couverture forestière pouvant stocker 205 gigatonnes de carbone [4].

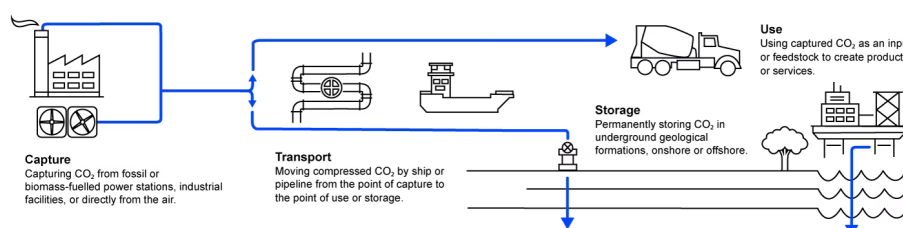


FIGURE 2.6 : Schéma de principe du Captage et Stockage du Carbone (CSC)

Source : Agence Internationale de l'Énergie (AIE), 2022

2.4.2 Stratégies d'atténuation dans le secteur agricole

Les émissions agricoles, qui représentent environ 30 % des émissions anthropiques totales, peuvent être considérablement réduites grâce à diverses stratégies [3]. Pour le bétail, des modifications alimentaires peuvent réduire les émissions de méthane [3]. Parmi les compléments alimentaires notables, le 3-nitrooxypropanol (3-NOP) et l'algue rouge *Asparagopsis taxiformis* peuvent réduire les émissions de méthane de 40 % et 90 % respectivement [8]. Les pratiques agricoles durables, telles que les systèmes sans labour, protègent la qualité de l'air tout en améliorant la qualité des sols [52].

La coopération internationale a mis en place des cadres importants pour la réduction des émissions. L'Accord de Paris exige des nations qu'elles limitent le réchauffement climatique à $1,5^\circ\text{C}$, ce qui nécessite une réduction des émissions de méthane d'origine agricole de 24 à 47 % et la réalisation d'émissions nettes de CO_2 nulles d'ici le milieu du siècle [2].

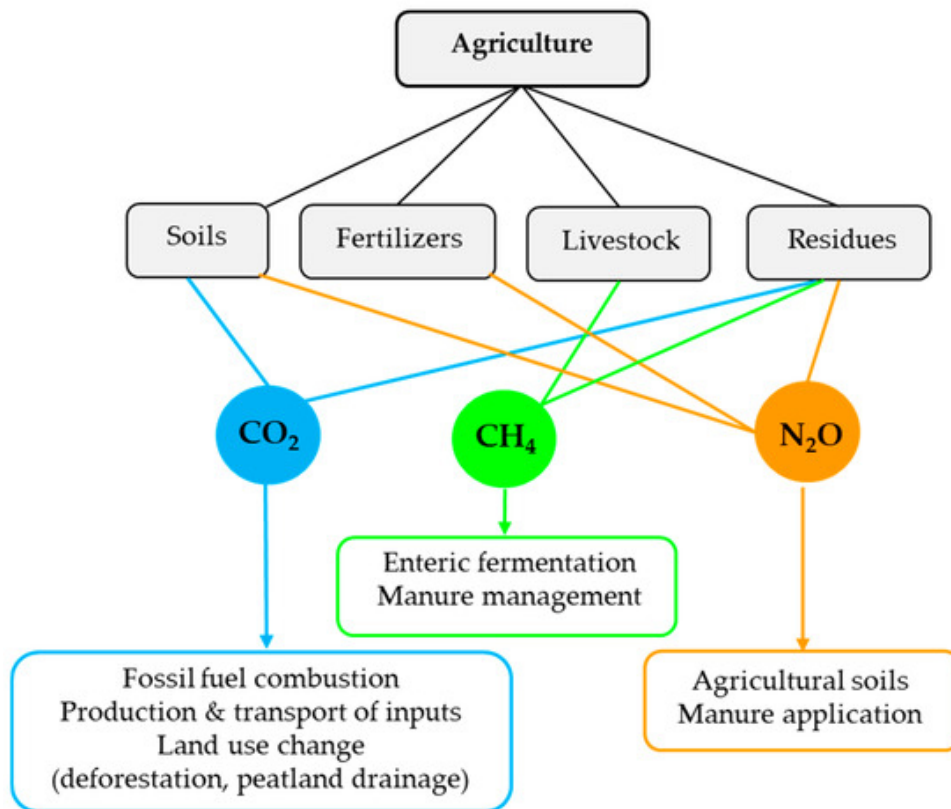


FIGURE 2.7 : Principales stratégies d'atténuation des GES dans le secteur agricole

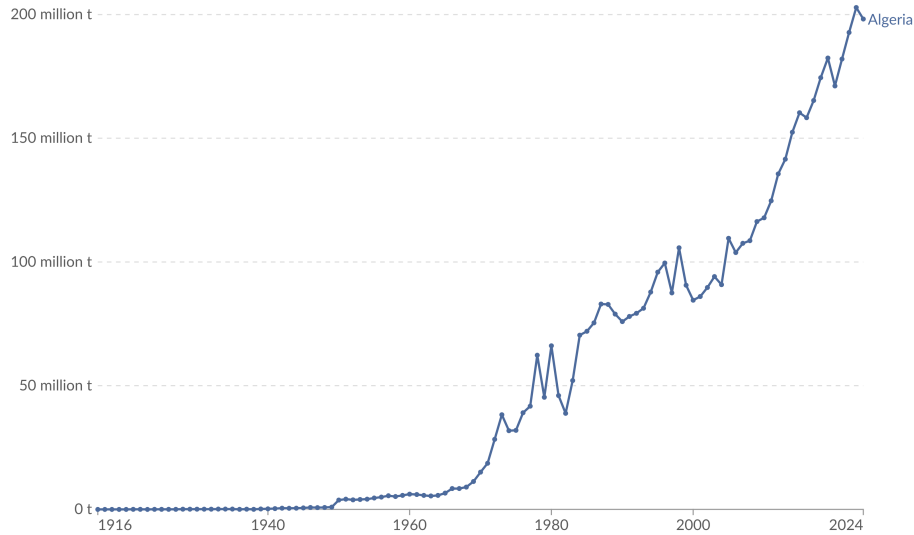
Source : FAO, 2022

2.5 Cas de l'Algérie

2.5.1 Niveaux et tendances actuels des émissions

Les émissions de gaz à effet de serre de l'Algérie ont suivi une trajectoire ascendante constante depuis plusieurs décennies. Les émissions de CO_2 ont augmenté de manière spectaculaire, passant de 22,3 millions de tonnes en 1971 à 163,5 millions de tonnes en 2020 (Figure 2.8), avec un taux de croissance annuel moyen de 4,63 % [9]. En 2014, l'Algérie avait atteint 145,4 millions de tonnes d'émissions de CO_2 , soit une augmentation de 2 260 % par rapport aux niveaux de 1963 [7].

Les niveaux d'émissions du pays ont placé l'Algérie au troisième rang des plus gros émetteurs de CO_2 en Afrique [10]. Des données récentes montrent que les émissions de CO_2 ont atteint 135,5 millions de tonnes en 2018, avec un taux de croissance moyen de 4,1 % au cours de la dernière décennie [54]. En termes d'émissions par habitant, l'Algérie a émis en moyenne 3,7 tonnes de CO_2 par habitant en 2020 [16].

FIGURE 2.8 : Évolution des émissions de CO₂ en Algérie (1971-2020)

Source : Agence Internationale de l'Énergie (AIE), Profil Algérie, 2022

2.5.2 Sources et contributions sectorielles

Le secteur de l'énergie représente la principale source d'émissions de gaz à effet de serre en Algérie [29]. La production d'électricité du pays dépend presque entièrement des ressources fossiles, 90 % de l'électricité étant produite dans des centrales thermiques alimentées au gaz naturel [35]. Le secteur des transports s'est imposé comme le principal contributeur sectoriel aux émissions, ayant généré près de 49 millions de tonnes d'équivalent CO₂ en 2020, soit 33,33 % des émissions totales de GES en Algérie [12]. Le secteur des bâtiments est responsable de plus de 30 % des émissions de CO₂ [27]. L'industrie des engrais génère des émissions substantielles [36]. Le secteur pétrolier et gazier algérien est à l'origine d'émissions de méthane estimées à 0,89 téragramme par an [31]. Les émissions agricoles combinées ont augmenté de 56 % entre 1980 et 2016 [22].

L'Algérie a pris des engagements formels visant à réduire ses émissions de gaz à effet de serre dans le cadre d'accords internationaux sur le climat. Dans le cadre de l'Accord de Paris, l'Algérie s'est engagée à réduire ses émissions de GES de 7 % d'ici 2020-2030 [20]. Avec un soutien international, la réduction des émissions pourrait passer de 7 % à 22 % d'ici 2030 [10, 20]. Pour soutenir ces objectifs, le pays a élaboré un programme national en matière d'énergies renouvelables visant à porter à 27 % la part des énergies solaire et éolienne dans le mix énergétique d'ici 2030 [54].

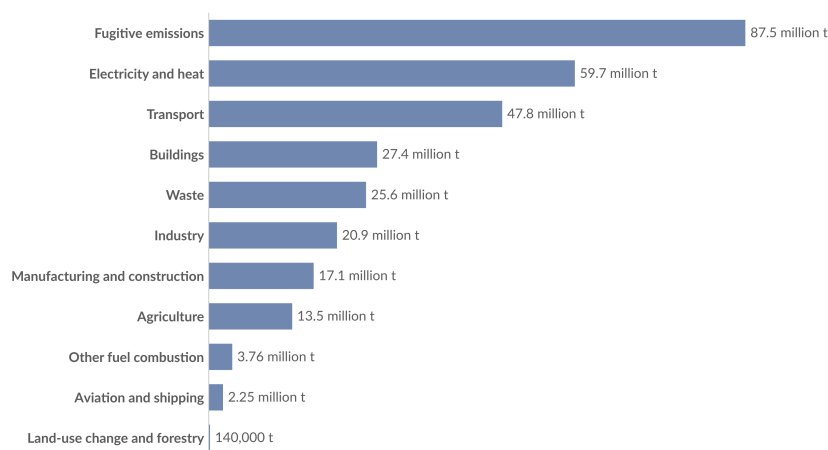


FIGURE 2.9 : Répartition sectorielle des émissions de GES en Algérie

Source : Agence Internationale de l'Énergie (AIE), 2022

2.5.3 Impacts du changement climatique et vulnérabilités

L'Algérie subit des impacts significatifs du changement climatique qui menacent à la fois son environnement et son développement socio-économique (Figure 2.10). Le pays a déjà connu une baisse substantielle des précipitations, la moyenne annuelle ayant diminué de 30 % au cours des dernières décennies [10]. Faisant partie de la région méditerranéenne, l'Algérie se trouve dans l'une des zones les plus exposées au changement climatique au monde [21, 57]. La région méditerranéenne, y compris l'Algérie, connaît des conditions estivales plus intenses et des taux de précipitations faibles et irréguliers [28]. Ces changements ont contribué à une dégradation forestière importante, le couvert forestier nord-africain ayant diminué de plus de 6,3 millions d'hectares entre 2000 et 2010 [28].

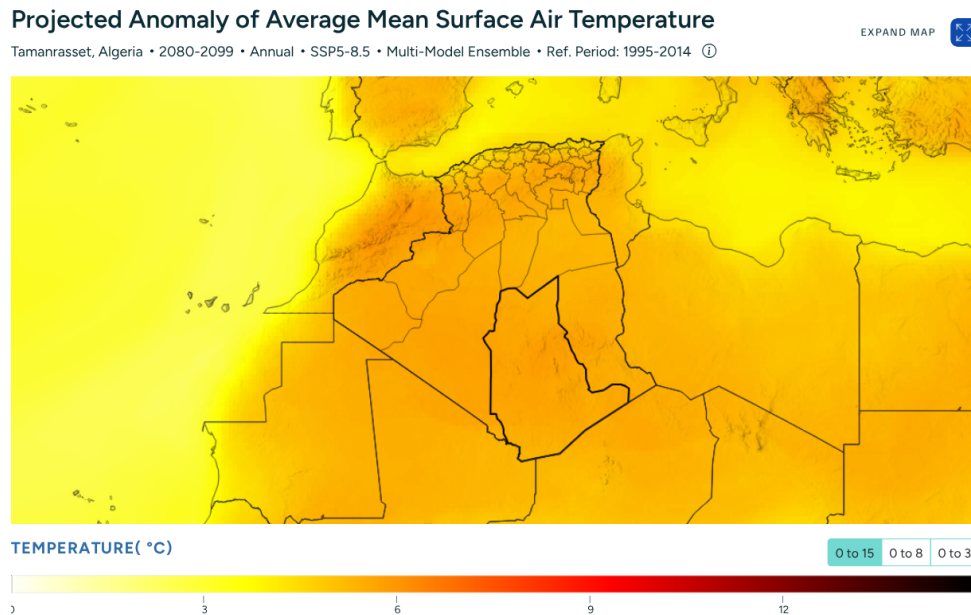


FIGURE 2.10 : Carte de la vulnérabilité climatique et de la baisse des précipitations en Algérie

Source : Portail de connaissances sur le climat, Banque Mondiale, 2021

2.6 Cadre conceptuel de la réglementation mondiale des émissions

Le cadre conceptuel de la réglementation mondiale des émissions de gaz à effet de serre repose essentiellement sur la reconnaissance du fait que le changement climatique nécessite une action internationale coordonnée. La pierre angulaire de ce cadre réglementaire est la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), adoptée en 1992 lors du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro [34]. La CCNUCC est la première convention internationale au monde concernant la maîtrise globale des émissions de gaz à effet de serre [34]. L'objectif principal de la Convention vise à stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique [26, 39].

Au cur du cadre de la CCNUCC se trouve le principe des responsabilités communes mais différenciées, qui reconnaît que les responsabilités et les capacités historiques diffèrent entre les nations [26, 34]. Ce principe reconnaît que les niveaux actuels de gaz à effet de serre dans l'atmosphère résultent principalement des émissions historiques des pays développés [26]. Ce cadre intègre également d'autres principes clés, notamment le principe de précaution et les principes de développement durable et d'équité [38].

À la suite de la mise en place du cadre de la CCNUCC, la communauté internationale a développé des mécanismes de mise en œuvre spécifiques. La première étape majeure a été le Protocole de Kyoto, adopté en décembre 1997 et entré en vigueur en février 2005

[23, 41, 58]. Dans le cadre de ce protocole, les pays industrialisés se sont engagés à réduire leurs émissions de GES de 5,2

L'Accord de Paris de 2015 représente l'évolution la plus récente et la plus complète de la gouvernance internationale en matière de climat [41, 48]. Contrairement à ses prédécesseurs, l'Accord de Paris a suscité une participation quasi universelle, avec près de 190 pays signataires représentant 90

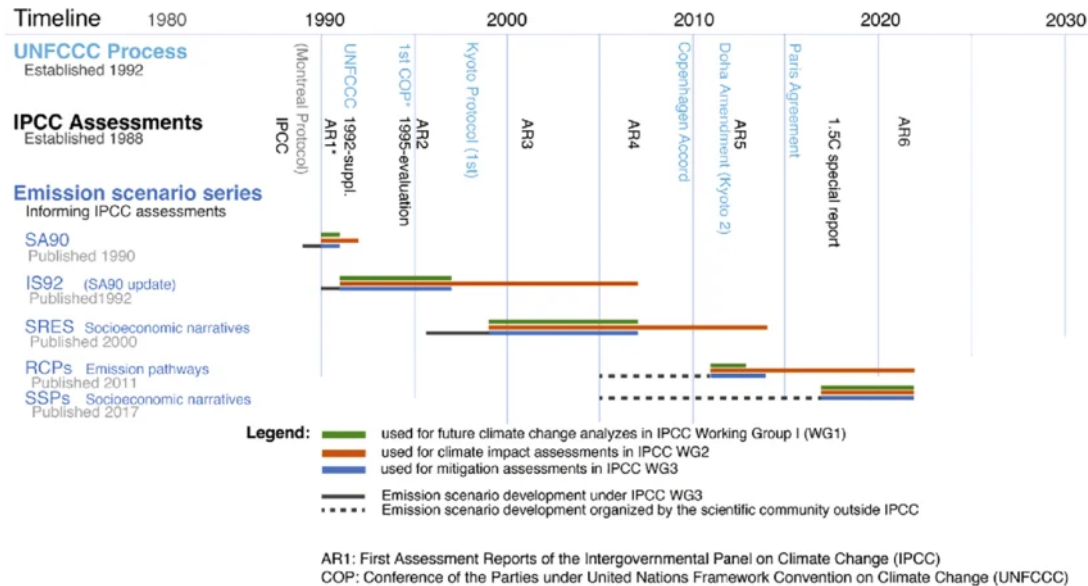


FIGURE 2.11 : Frise chronologique des accords internationaux sur le climat

Source : Réalisé par l'auteur, 2024

2.6.1 Systèmes de plafonnement et d'échange (Cap-and-Trade)

Les mécanismes de plafonnement et d'échange constituent l'approche fondée sur le marché la plus répandue pour contrôler les émissions. Dans les programmes de plafonnement et d'échange, une agence gouvernementale fixe une limite totale d'émissions de carbone, puis attribue ce plafond aux entités soumises à la réglementation sous la forme de crédits carbone [51] (Figure 2.12). Le système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne (SEQUE-UE), mis en place en 2005, constitue le premier grand système d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre au monde et couvre environ 40 % des émissions totales de l'UE [14, 46]. De nombreux pays ont depuis mis en place leurs propres marchés d'échange de quotas d'émission [59].

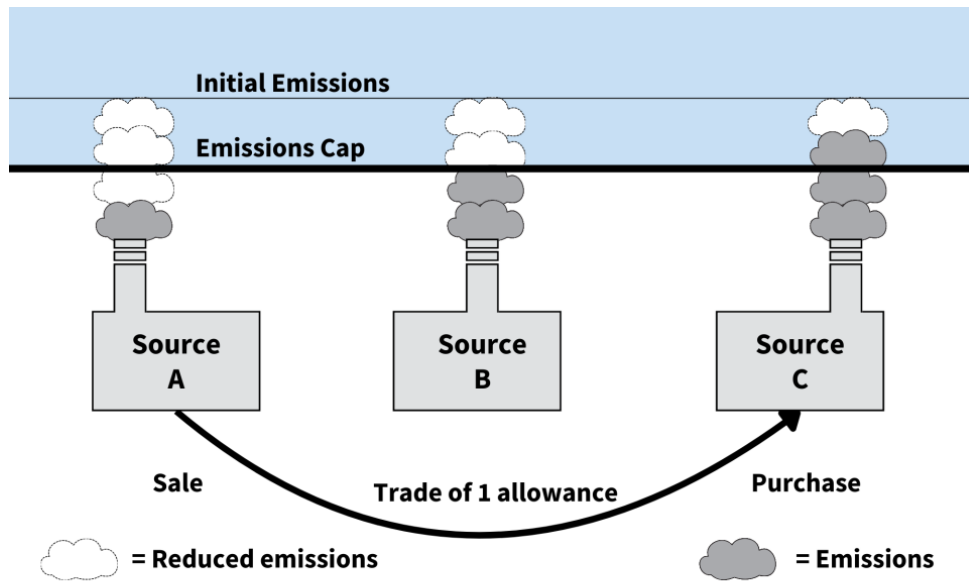


FIGURE 2.12 : Fonctionnement du système de plafonnement et d'échange (Marché du carbone)

Source : Banque Mondiale, 2023

Chapitre 3

Matériel et Méthodes

3.1 Zone d'étude

3.1.1 Présentation générale

La Wilaya de Djelfa est une entité administrative de grande envergure située au centre de l'Algérie, à la jonction des zones nord semi-arides et des zones présahariennes. Elle constitue l'une des plus grandes wilayas du pays en termes de superficie, avec une position géographique stratégique qui lui confère un rôle charnière entre les régions septentrionales agricoles et les espaces sahariens au sud (Figure 3.1). D'un point de vue écologique et bioclimatique, la wilaya appartient majoritairement à l'étage aride inférieur à semi-aride, caractérisé par une pluviométrie annuelle variant entre 200 et 350 mm selon les zones, des hivers rigoureux et des étés chauds et secs.

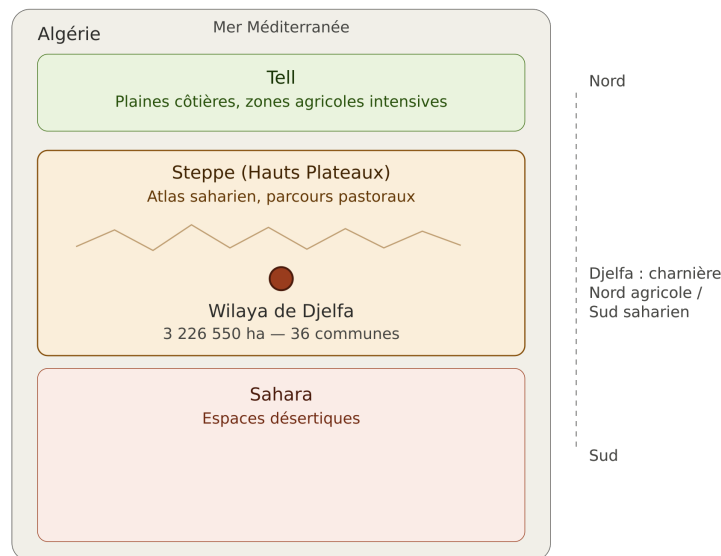


FIGURE 3.1 : Localisation schématique de la Wilaya de Djelfa, à la charnière entre le Tell, la Steppe (Hauts Plateaux) et le Sahara

Source : Conception de l'auteur

3.1.2 Relief, géologie et pédologie

Le relief de la Wilaya de Djelfa est marqué par la présence de l'Atlas saharien, une chaîne de montagnes qui traverse la partie centrale et confère au territoire une topographie variée, favorable au développement de la végétation forestière sur les hauteurs des communes d'Aïn Maâbed, de Zaafrane et de Sidi Baïzid. Les plaines qui encadrent ce massif (Maalba, El Merdja, Tisselouine, El Gaa) constituent les principales zones à vocation agricole, et les vallées des Oueds Touil (nord-ouest) et Djeddi (sud) représentent des axes hydrographiques importants. Les sols agricoles, généralement profonds et peu sensibles à l'érosion, se répartissent entre sols alluviaux des vallées, sols des plaines de l'Atlas saharien, sols des zones d'épandage de crue du piémont nord, et sols des Dayas et lits d'oueds riches en matière organique.

3.1.3 Occupation du sol et ressources agropastorales

L'analyse de la répartition des terres au 31 décembre 2022 révèle une structure foncière dominée par les parcours steppiques (Tableau 3.1), reflet direct du contexte agropastoral de la région.

TABLE 3.1 : Répartition de la superficie agricole de la Wilaya de Djelfa

Catégorie	Superficie (ha)	Part (%)
Superficie Agricole Totale (SAT)	2 501 093	100 % ST (77,54 % superficie totale)
Surface Agricole Utile (SAU)	387 052	15,48 % SAT
dont SAU irriguée	60 215	15,56 % SAU
dont SAU en sec	332 537	85,90 % SAU
Superficie des parcours	2 114 041	84,52 % SAT

Source : DSA Djelfa, Monographie 2023.

La SAU se concentre essentiellement dans les zones de plaines et de piémonts où la disponibilité en eau autorise une exploitation plus intensive. Pour la campagne 2021/2022, les productions végétales se répartissent entre céréales (29 567 ha, 670 000 Qx), cultures fourragères (3 876 ha), cultures maraîchères (8 730 ha, 2 595 670 Qx) et arboriculture fruitière (16 710 ha). Sur le plan animal, l'élevage constitue le pilier socio-économique de la wilaya : le cheptel de la campagne 2021/2022 est dominé par les ovins (3 353 800 têtes, race Ouled Djellal prédominante), suivis des caprins (378 200), tandis que bovins (22 100) et camélins (774) restent marginaux ; le secteur avicole connaît par ailleurs un essor marqué (4 851 300 poulets/dindes, 403 000 poules pondeuses).

3.1.4 Patrimoine forestier

Le couvert forestier de la wilaya représente une composante écologique majeure dans la lutte contre la désertification, avec une superficie totale de 210 633,40 ha, soit 6,51 % de la superficie totale (Tableau 3.2). La forêt naturelle (152 753,06 ha), composée essentiellement de pin d'Alep (*Pinus halepensis*), se concentre sur les hauteurs de l'Atlas saharien, tandis que les reboisements (57 880,34 ha) s'inscrivent dans le cadre du projet du Barrage Vert.

TABLE 3.2 : Répartition du patrimoine forestier de la Wilaya de Djelfa

Type de formation forestière	Superficie (ha)	Part (%)
Forêts denses à moyennement denses de Pin d'Alep	71 707,64	34,0 %
Maquis à repeupler ou à reconstituer	81 045,41	38,5 %
Reboisements existants	57 880,34	27,5 %
Total superficie forestière	210 633,40	100 %

Source : Conservation des Forêts, Monographie 2023.

3.2 Période de référence

La période d’analyse diachronique pour l’inventaire des émissions de l’élevage s’étend sur 26 campagnes agricoles, de 1999/2000 à 2024/2025. Pour les analyses de télédétection (NDVI), la comparaison porte sur une fenêtre de 20 ans, en se concentrant sur les printemps 2005 et 2025 ; le bilan LULUCF couvre quant à lui la période 2005–2020, contrainte par la disponibilité des produits MODIS MCD12Q1 exploités.

3.3 Sources des données d’activité

Les données d’activité constituent le premier paramètre de l’équation fondamentale du GIEC :

$$\text{Émissions GES} = \text{Données d'Activité (DA)} \times \text{Facteur d'Émission (FE)} \quad (3.1)$$

Les données utilisées dans cette étude ont été collectées auprès des organismes officiels suivants (Tableau 3.3) :

TABLE 3.3 : Sources des données d’activité utilisées dans l’étude

Source	Données collectées	Format
Direction des Services Agricoles (DSA) de Djelfa	Effectifs du cheptel (ovins, bovins, caprins, camelins, volailles) par campagne agricole 1999/2000 – 2024/2025	Tableau statistique annuel (CSV)
Conservation des Forêts de la Wilaya	Superficie forestière par type et par commune, taux de reboisement, espèces dominantes	Rapport annuel (Monographie 2023)
Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires (DPSB)	Monographie générale de la Wilaya, données de productions agricoles et animales	Document officiel (PDF)
Copernicus / USGS / NASA	Images satellitaires Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI (résolution 30 m) et données atmosphériques Sentinel-5P TROPOMI (CH ₄ , NO ₂)	GeoTIFF / NetCDF via Google Earth Engine

3.4 Quantification des émissions du secteur de l’élevage

3.4.1 Catégories sources inventoriées

Conformément au Volume 4 des Lignes directrices du GIEC (2006), trois catégories sources d’émissions ont été quantifiées pour le sous-secteur de l’élevage :

- **Catégorie 3.A : Fermentation entérique** – émissions de méthane (CH_4) produites lors de la digestion des aliments par les ruminants (ovins, bovins, caprins, camélins).
- **Catégorie 3.B : Gestion des déjections** – émissions de méthane (CH_4) résultant de la décomposition anaérobie des déjections animales dans les systèmes de gestion des fumiers.
- **Catégorie 3.D : Déjections laissées sur les pâturages** – émissions de protoxyde d’azote (N_2O) issues de l’azote excrété directement sur les parcours steppiques.

3.4.2 Facteurs d’émission utilisés

L’inventaire a été réalisé selon une approche de Niveau 1 (Tier 1) pour les valeurs par défaut du GIEC adaptées à la région nord-africaine (climat sec), et une approche de Niveau 2 (Tier 2) pour les ovins (Tableau 3.4).

TABLE 3.4 : Facteurs d’émission utilisés pour l’inventaire GES de l’élevage (Source : GIEC 2006, Tier 1 et Tier 2)

Espèce	FE Entérique (kg CH_4 /tête/an)	FE Fumier CH_4 (kg CH_4 /tête/an)	N excrété (kg N/tête/an)
Ovin (Ouled Djellal)	6,88 (Tier 2)	0,15	1,2
Bovin	50,0 (Tier 1)	1,0	40,0
Caprin	5,0 (Tier 1)	0,17	1,3
Camelin	46,0 (Tier 1)	2,1	15,0
Volaille (poulets/dindes)	0,0	0,02	0,6

Pour la fermentation entérique ovine (Tier 2), le facteur d’émission de 6,88 kg CH_4 /tête/an a été calculé selon l’approche de l’ingestion d’énergie brute, tenant compte d’un poids vif moyen de 35 kg, d’une digestibilité de 58 % et d’un taux de conversion $Y_m = 7\%$.

3.4.3 Potentiel de Réchauffement Global appliqué

Conformément aux protocoles de reporting internationaux, les valeurs du Potentiel de Réchauffement Global (PRG) issues du 5^e Rapport d’Évaluation (AR5) du GIEC ont été appliquées : Méthane (CH_4) PRG = 28 et Protoxyde d’azote (N_2O) PRG = 265 (horizon 100 ans).

3.4.4 Équations de calcul

Les émissions de chaque catégorie source ont été calculées selon les formules suivantes :

$$\text{CH}_{4,\text{fermentation entérique}} = \sum_i (\text{Effectif}_i \times FE_{\text{entérique},i}) \quad (3.2)$$

$$CH_{4,déjections} = \sum_i (Effectif_i \times FE_{fumier,i}) \quad (3.3)$$

$$N_2O_{pâturages} = \sum_i (Effectif_i \times N_{excrété,i}) \times FE_{N_2O} \times \frac{44}{28} \quad (3.4)$$

$$Total \text{ (tCO}_2\text{e)} = \left[\left(\frac{CH_{4,total}}{1000} \right) \times PRG_{CH_4} \right] + \left[\left(\frac{N_2O_{total}}{1000} \right) \times PRG_{N_2O} \right] \quad (3.5)$$

où $FE_{N_2O} = 0,01 \text{ kg N}_2\text{O-N} / \text{kg N excreté}$ (GIEC 2006, Tier 1) et le facteur $44/28$ représente le ratio des masses molaires de N_2O et de N_2 .

3.5 Analyse spatiale par télédétection

3.5.1 NDVI diachronique

Pour valider les statistiques administratives et cartographier l'évolution du couvert végétal steppique, l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) a été calculé à partir d'images satellitaires multitemporelles : Landsat 5 TM (Collection 2, Tier 1 Surface Reflectance) pour le printemps 2005 (mars-juin), et Landsat 8 OLI pour le printemps 2025, à résolution 30 m. Le NDVI est calculé selon :

$$NDVI = \frac{(PIR - Rouge)}{(PIR + Rouge)} \quad (3.6)$$

Pour Landsat 5 : Bande 4 (PIR) et Bande 3 (Rouge) ; pour Landsat 8 : Bande 5 (PIR) et Bande 4 (Rouge). Des composites médians saisonniers ont été générés après application d'un masque de nuages et d'ombres basé sur la bande QA_PIXEL.

La carte de changement diachronique a été obtenue par soustraction des deux composites :

$$\Delta NDVI = NDVI_{2025} - NDVI_{2005} \quad (3.7)$$

Un seuil de détection de $\Delta NDVI = \pm 0,05$ a été appliqué pour discriminer trois catégories d'évolution : dégradation ($\Delta NDVI < -0,05$), stabilité ($-0,05 \leq \Delta NDVI \leq +0,05$) et reverdissement ($\Delta NDVI > +0,05$).

3.5.2 Cartographie des concentrations atmosphériques

Les concentrations atmosphériques de méthane (CH_4) ont été cartographiées à partir des données de l'instrument TROPOMI embarqué sur Sentinel-5P, avec un composite moyen annuel pour 2025. Les données NASA ORNL (Spawn et al., 2020) ont été utilisées

pour cartographier les stocks de carbone de la biomasse aérienne (AGB) et souterraine (BGB) en Mg C/ha.

3.5.3 Volet LULUCF

Conformément aux Lignes directrices du GIEC (2006, révisées 2019), les émissions et absorptions nettes liées aux changements d’affectation des terres ont été estimées par l’approche par différences de stocks. Les superficies converties entre cinq classes d’occupation du sol (Forêt, Prairie/Steppe, Agriculture, Sol nu, Urbain) ont été extraites par classification supervisée d’images MODIS MCD12Q1 (résolution 500 m) sur la période 2005–2020, via Google Earth Engine (Annexe A). Les stocks de carbone par classe ont été empruntés aux valeurs par défaut du GIEC Volume 4 (Tableaux 4.7, 4.9, 6.3), adaptées aux écosystèmes semi-arides méditerranéens (Tableau 3.5).

TABLE 3.5 : Stocks de carbone totaux par classe d’occupation du sol (tC/ha)

Classe	Stock total (tC/ha)
Forêt	68
Prairie / Steppe	39
Agriculture	28
Sol nu	15,7
Urbain	10

Source : GIEC Volume 4 (2006) et adaptations pour zones semi-arides.

Le bilan net LULUCF a été calculé comme la somme des flux de carbone associés à l’ensemble des transitions identifiées :

$$\Delta C = \sum_{i,j} (A_{i \rightarrow j} \times (C_j - C_i)) \times \frac{44}{12} \quad (3.8)$$

où $A_{i \rightarrow j}$ est la superficie convertie de la classe i vers la classe j (ha), C_i et C_j sont les stocks de carbone des classes initiale et finale (tC/ha), et $44/12$ le facteur de conversion du carbone en CO_2 .

3.6 Approches de modélisation

Trois approches complémentaires ont été mobilisées pour modéliser la relation entre effectifs animaux, variables environnementales et émissions de GES :

- **OLS + ARIMA** : régression linéaire multiple des émissions totales sur les effectifs par espèce et une variable de tendance temporelle, les résidus étant modélisés par un processus ARIMA(1,1,1) ;

- **Random Forest de base** : modèle d'ensemble (forêts aléatoires) utilisant les effectifs par espèce comme variables explicatives, évalué par validation croisée Leave-One-Out (LOO) compte tenu de la taille restreinte de l'échantillon ($n = 23$ campagnes après exclusion de 1999) ;
- **Random Forest Tier 2 enrichi** : même architecture, enrichie de trois variables environnementales extraites par Google Earth Engine – NDVI moyen annuel (MODIS), précipitations annuelles (ERA5-Land) et température de surface (LST, MODIS) – afin de tester l'apport prédictif direct des conditions climatiques.

La performance des trois modèles est évaluée par le coefficient de détermination (R^2) en entraînement et en validation croisée LOO, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE). L'importance des variables du Random Forest est quantifiée par permutation.

3.7 Traitement des données

L'ensemble des calculs matriciels d'inventaire GES a été automatisé à l'aide d'un script Python (Pandas, NumPy, Matplotlib ; Annexe B). Les données brutes issues des fichiers CSV de la DSA ont été prétraitées avant intégration dans les équations du GIEC. La structuration de l'inventaire est conforme aux exigences du logiciel CIRIS, basé sur le protocole GPC.

3.8 Limites méthodologiques et gestion des incertitudes

Les principales sources d'incertitude identifiées sont : (i) les limites des données d'activité – statistiques DSA reposant en partie sur des déclarations, et absence de données ovines, bovines, caprines et camelines pour 2023/2024 et 2024/2025 ; (ii) les limites des facteurs d'émission – approche Tier 1 pour les espèces autres que les ovins ; (iii) les limites de la télédétection – résolution spatiale de 30 m (Landsat) et 500 m (MODIS), susceptible de lisser les hétérogénéités fines du couvert steppique. Une démarche de triangulation a été mise en uvre, croisant les tendances des effectifs animaux avec les résultats NDVI et les concentrations satellitaires Sentinel-5P.

Chapitre 4

Résultats

4.1 Évolution des effectifs animaux (1999/2000 – 2024/2025)

Les effectifs animaux de la Wilaya de Djelfa présentent des variations interannuelles significatives sur la période d'étude. L'effectif ovin, dominante du cheptel, connaît une évolution caractérisée par des phases de croissance et des ruptures structurelles associées aux aléas climatiques. La rupture la plus marquée intervient lors de la campagne 2021/22, avec une chute de 53,1 % des effectifs ovins (de 4 142 800 à 1 941 910 têtes), vraisemblablement imputable à une sécheresse sévère ayant provoqué des mortalités massives et des ventes forcées. Le cheptel amorce une reprise partielle dès la campagne suivante (2 767 541 têtes en 2022/2023), sans toutefois retrouver son niveau d'avant-crise.

Les effectifs caprins suivent une trajectoire globalement parallèle à celle des ovins, avec une chute similaire en 2021/2022 (de 390 500 à 228 429 têtes, soit -41,5 %), tandis que les effectifs bovins et camelins, bien que numériquement marginaux, montrent également une sensibilité au choc climatique de 2021/2022 (Figure 4.1).

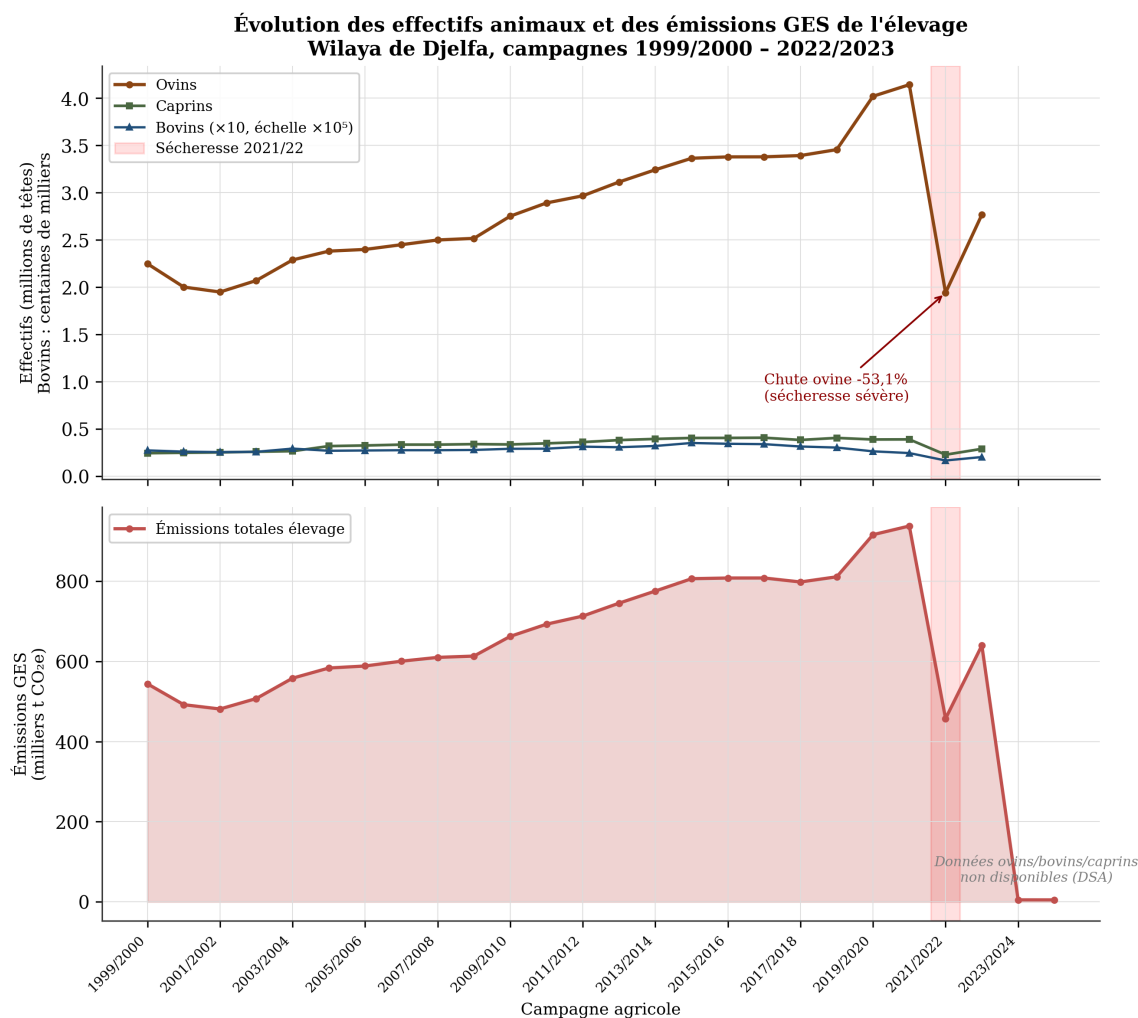


FIGURE 4.1 : Évolution des effectifs animaux (ovins, caprins, bovins) et des émissions GES totales de l'élevage, Wilaya de Djelfa, campagnes 1999/2000–2022/2023

Source : Traitement de l'auteur, données DSA Djelfa

Comme indiqué en Section 3.7, les données d'effectifs ovins, bovins, caprins et camelins ne sont pas renseignées par la DSA pour les campagnes 2023/2024 et 2024/2025 : ce vide statistique apparaît clairement sur la Figure 4.1, où les courbes d'effectifs et d'émissions s'interrompent après 2022/2023.

4.2 Émissions de GES par catégorie source

L'application de la méthodologie d'inventaire aux séries zootechniques a permis de reconstruire la trajectoire historique des émissions liées à l'élevage. Les émissions sont passées de 543 981 tCO₂e en 1999/2000 à un pic absolu de 937 786 tCO₂e en 2020/2021, avant de s'effondrer à 457 227 tCO₂e en 2021/2022 (–51,2 %).

La décomposition par catégorie source confirme la prédominance écrasante de la fermentation entérique (Catégorie 3.A), qui représente entre 92 et 95 % du total des émis-

sions liées à l'élevage selon les campagnes, loin devant la gestion du fumier (Catégorie 3.B, 2–3 %) et les pâturages (Catégorie 3.D, 3–4 %). Cette hiérarchie est directement liée à la structure du cheptel, très majoritairement ovine (Figure 4.2).

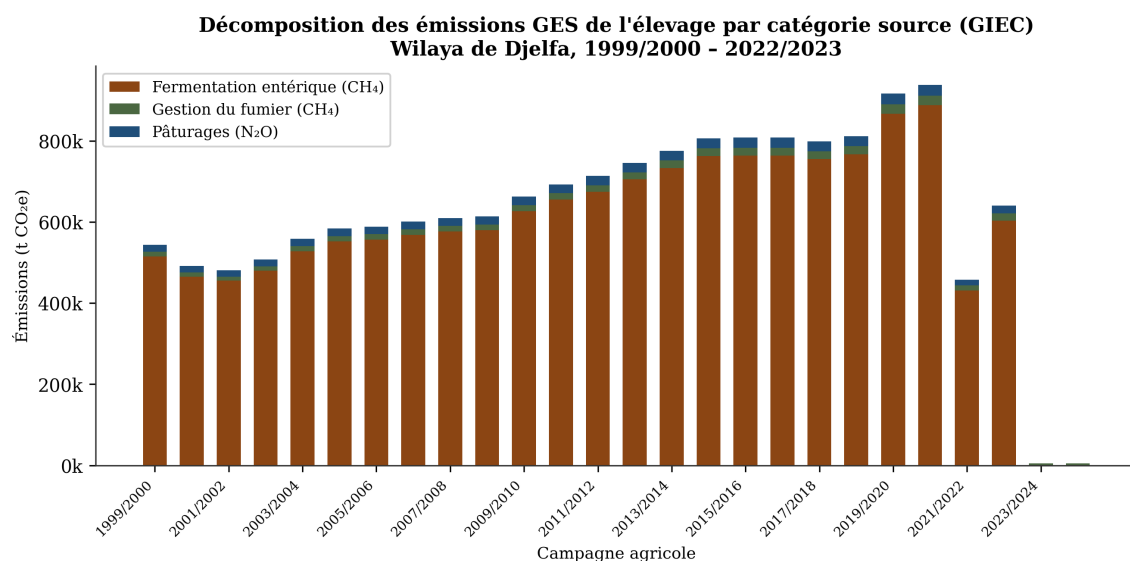


FIGURE 4.2 : Décomposition des émissions GES de l'élevage par catégorie source GIEC (3.A Fermentation entérique, 3.B Gestion du fumier, 3.D Pâturages), Wilaya de Djelfa, 1999/2000–2022/2023

Source : Traitement de l'auteur

4.3 Dynamique du couvert végétal steppique (NDVI diachronique 2005–2025)

L'analyse NDVI diachronique sur la wilaya de Djelfa révèle trois catégories d'évolution du couvert végétal entre 2005 et 2025. Le NDVI moyen annuel oscille entre 0,138 et 0,205, caractéristique d'une steppe semi-aride en zone présaharienne. Le pic de 2009 (NDVI = 0,205) coïncide avec une pluviométrie de 235 mm/an, illustrant la sensibilité de la végétation steppique aux précipitations inter-annuelles. La chute du NDVI en 2021 (0,138) avec une précipitation de seulement 152 mm/an confirme le lien entre stress hydrique, dégradation des pâturages et effondrement des effectifs.

La cartographie du NDVI pour le printemps 2025 (Figure 4.3) confirme spatialement ce diagnostic : le couvert végétal le plus dense (teintes vert-jaune) se concentre dans la moitié nord de la wilaya, en particulier autour des zones de plaine et de piémont (Birine, Aïn Oussera), tandis que la dominante bleu foncé sur l'ensemble de la moitié sud traduit un NDVI structurellement faible, cohérent avec la transition vers les marges sahariennes décrite au Chapitre 3.

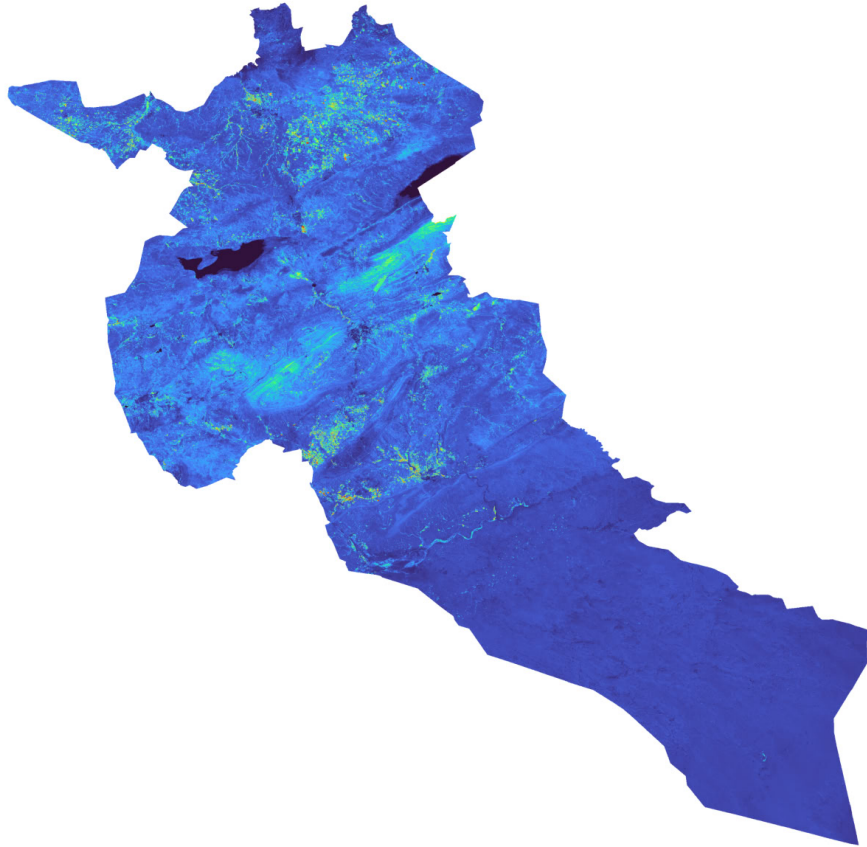


FIGURE 4.3 : Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) de la Wilaya de Djelfa, composite printanier 2025

Source : Traitement de l'auteur, Landsat 8 OLI via Google Earth Engine

La carte de changement diachronique ($\Delta NDVI = NDVI_{2025} - NDVI_{2005}$, Figure 4.4) met en évidence une dominante de stabilité à léger reverdissement (teintes bleu clair) sur la majeure partie du territoire, avec deux foyers de dégradation nette (teintes rouges) localisés respectivement au centre-ouest et au nord-est de la wilaya. Ces foyers, de superficie limitée mais d'intensité marquée, se situent dans des secteurs de plaine soumis à une pression agropastorale et/ou une mise en culture plus intense, cohérente avec les transitions Steppe $\rightarrow$ Agriculture et Steppe $\rightarrow$ Sol nu quantifiées par le bilan LULUCF (Section 4.7).



FIGURE 4.4 : Carte de changement diachronique du NDVI ($\Delta\text{NDVI} = \text{NDVI}_{2025} - \text{NDVI}_{2005}$) superposée au fond satellite; les teintes bleues indiquent une stabilité à un léger reverdissement, les teintes rouges une dégradation localisée du couvert végétal

Source : Traitement de l'auteur, Landsat 5 TM / Landsat 8 OLI via Google Earth Engine

4.4 Occupation du sol

La carte d'occupation du sol (Figure 4.5), utilisée comme support à la classification LULUCF du Chapitre 3, fait apparaître une dominante steppique homogène sur la quasi-totalité du territoire (teintes grises), ponctuée de plusieurs foyers d'urbanisation et de mise en valeur agricole (teintes jaunes) concentrés au nord et au centre-ouest de la wilaya – notamment autour du chef-lieu, de Birine et d'Aïn Oussera – ainsi que de plans d'eau temporaires (Chotts/Sebkhas, teintes bleu foncé) visibles au centre-nord du territoire.



FIGURE 4.5 : Occupation du sol de la Wilaya de Djelfa : zones bâties et mises en valeur agricole (jaune), plans d'eau (bleu foncé) et matrice steppique dominante (gris)

Source : Traitement de l'auteur, classification MODIS MCD12Q1 via Google Earth Engine

4.5 Concentrations atmosphériques de méthane et stock de carbone

La concentration moyenne en méthane atmosphérique mesurée par Sentinel-5P TROPOMI sur 2025 est de 1 927,9 ppb, légèrement supérieure à la moyenne mondiale ($\sim 1\,920$ ppb), ce qui est cohérent avec la présence d'importantes sources d'émissions entériques liées à l'élevage ovin et à l'activité pétrolière et gazière dans la partie sud de la wilaya. La cartographie spatiale des concentrations (Figure 4.6) révèle deux foyers de concentration élevée (teintes vert-jaune) situés au nord-ouest de la wilaya, dans des secteurs qui correspondent aux zones de plus forte densité de cheptel et d'activité agropastorale identifiées au Chapitre 3, tandis que le reste du territoire affiche une concentration de fond homogène (teinte violette uniforme).

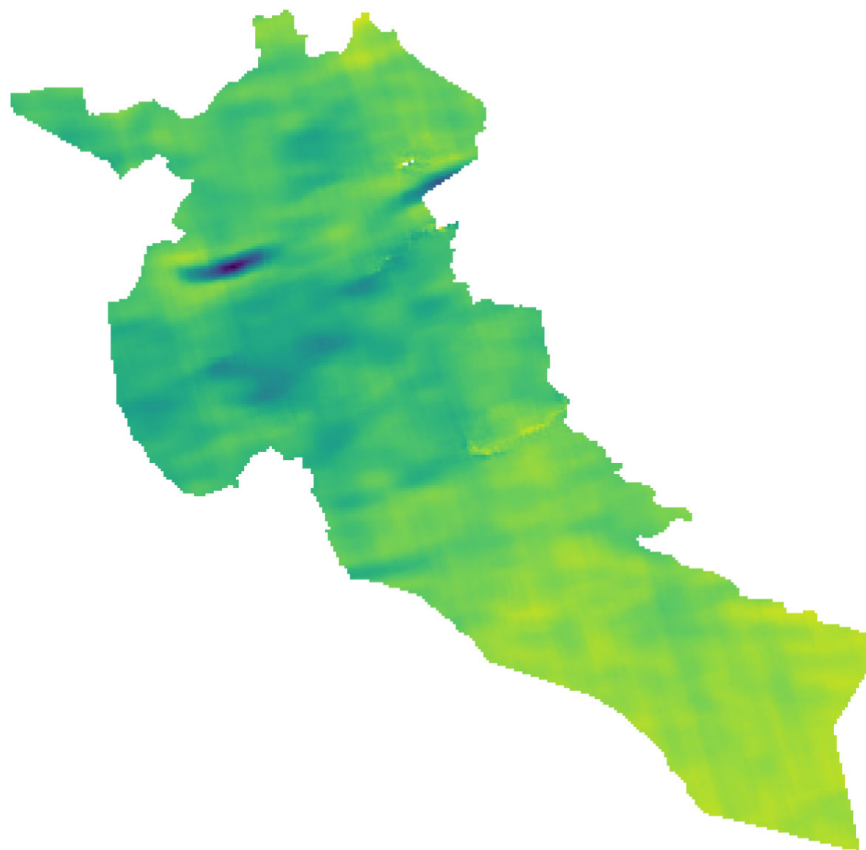


FIGURE 4.6 : Concentrations atmosphériques moyennes de méthane (CH_4) au-dessus de la Wilaya de Djelfa, composite annuel 2025

Source : Traitement de l'auteur, Sentinel-5P TROPOMI via Google Earth Engine

Le stock de carbone de la biomasse AFOLU de la wilaya, estimé à partir des données NASA ORNL [42], s'élève à 19,14 millions de tonnes de carbone (tC), soit un équivalent CO_2 de 70,19 millions de t CO_2e (conversion par le facteur 44/12). Ce stock représente la biomasse aérienne et souterraine de l'ensemble des écosystèmes terrestres de la wilaya.

4.6 Bilan LULUCF (2005–2020)

L'analyse diachronique des images MODIS entre 2005 et 2020 révèle une dynamique d'occupation des sols marquée par une dégradation importante des parcours steppiques. Le Tableau 4.1 présente la matrice de transition et le bilan carbone associé, et la Figure 4.8 en propose une représentation synthétique par transition.

TABLE 4.1 : Matrice de transition et bilan carbone LULUCF (2005–2020)

Transition (De À)	Superficie (ha)	ΔC (tC/ha)	ΔC total (tC)	ΔCO_2 (tCO ₂)
Prairie/Steppe Agriculture	13 418,66	-11	-147 605	-541 219
Prairie/Steppe Sol nu	129 378,42	-23,3	-3 014 117	-11 051 763
Prairie/Steppe Urbain	20,58	-29	-597	-2 189
Agriculture Prairie/Steppe	10 168,38	+11	+111 852	+410 125
Sol nu Prairie/Steppe	25 041,10	+23,3	+583 458	+2 139 345
Bilan net LULUCF (2005–2020)				-9 045 701
Moyenne annuelle (2005–2020)				-603 047

Source : Calculs de l’auteur à partir des données MODIS MCD12Q1 et des facteurs de carbone du GIEC (Volume 4).

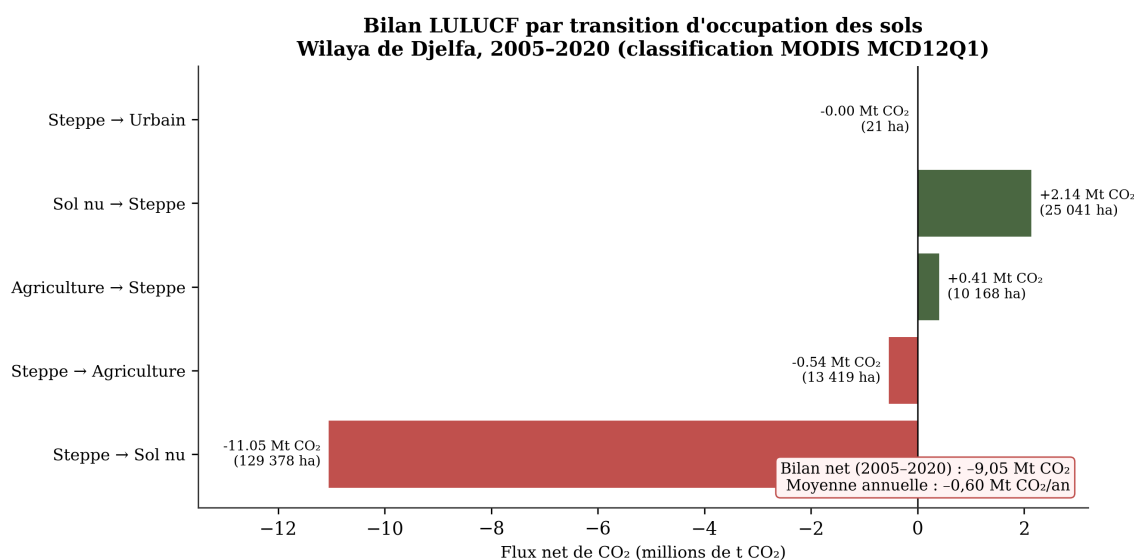


FIGURE 4.7 : Bilan net de carbone (LULUCF) par transition d’occupation des sols, Wilaya de Djelfa, 2005–2020

Source : Traitement de l’auteur, classification MODIS MCD12Q1

La superficie convertie de prairie en sol nu s’élève à 129 378 ha, tandis que 13 419 ha de prairie ont été mis en culture. À l’inverse, 25 041 ha de sol nu ont connu un reverdissement (reconversion en prairie) et 10 168 ha de terres agricoles ont été abandonnées au profit de la steppe. L’application des facteurs de stock de carbone du GIEC aboutit à un bilan net LULUCF de $-9,05$ millions de tCO₂ sur la période 2005–2020, soit une émission moyenne annuelle de $0,60$ MtCO₂/an.

4.7 Performance comparative des modèles

Le Tableau 4.2 présente les indicateurs de performance des trois modèles en validation croisée Leave-One-Out (LOO), considérée comme la méthode de validation la plus robuste

pour de petits échantillons ($n = 23$ observations après exclusion de 1999).

TABLE 4.2 : Synthèse comparative des performances des modèles de modélisation

Modèle	R $\check{s}$ (train)	R $\check{s}$ (LOO-CV)	RMSE (LOO)	MAPE (LOO)
OLS + ARIMA	1,000	$\sim 1,000$	220 tCO ₂ e	0,03 %
RF Base (effectifs)	0,945	0,820	57 490 tCO ₂ e	4,93 %
RF Tier 2 enrichi	0,946	0,780	63 548 tCO ₂ e	5,62 %

Le modèle OLS affiche un $R\check{s} = 1,000$ avec une MAPE de 0,03 %, reflétant la structure linéaire inhérente à la méthodologie GIEC Tier 1. L'équation OLS estimée – Émissions = $-298\,475 + 0,2025 \cdot \text{Ovin} + 1,5891 \cdot \text{Bovin} + 0,1408 \cdot \text{Caprin} + 1,4052 \cdot \text{Camelin} + 149,9 \cdot \text{Tendance}$ – est directement interprétable en termes de facteurs d'émission par espèce. Le coefficient ovin (0,2025 tCO₂e/tête) est cohérent avec les valeurs tabulées par le GIEC pour les ovins des zones arides méditerranéennes.

Le modèle RF de base atteint un $R\check{s}$ LOO = 0,820 et une MAPE = 4,93 %. L'analyse de l'importance des variables par permutation confirme la hiérarchie attendue : l'effectif ovin domine avec une importance de 28,7 %, suivi du caprin (25,1 %) – ces deux espèces représentent à elles seules 53,8 % du pouvoir prédictif du modèle (Figure 4.9, panneau de gauche). La campagne 2021/22 génère l'erreur LOO la plus élevée, avec une surestimation de +43,3 % pour le RF de base, cette anomalie correspondant à la chute brutale des effectifs ovins imputable à la sécheresse.

Contrairement à l'hypothèse initiale, le modèle RF Tier 2 enrichi des variables environnementales n'améliore pas les performances globales : le $R\check{s}$ LOO passe de 0,820 à 0,780 et la MAPE se dégrade de 4,93 % à 5,62 %. L'analyse d'importance par permutation révèle que NDVI, précipitations et LST affichent des importances très faibles (respectivement 0,0137, 0,0138 et 0,0084), contre 0,2871 pour l'ovin et 0,2508 pour le caprin (Figure 4.9, panneau de droite).

Importance des variables par permutation — comparaison des modèles Random Forest

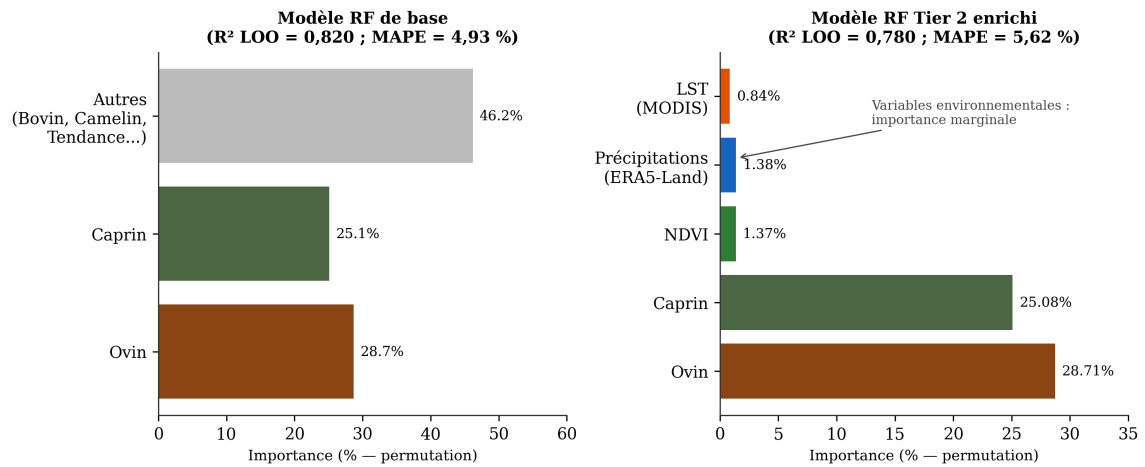


FIGURE 4.8 : Importance des variables par permutation — modèle Random Forest de base (gauche) et modèle Tier 2 enrichi de variables environnementales (droite)

Source : Traitement de l'auteur

Chapitre 5

Discussion

5.1 Déterminants structurels des émissions et architecture en deux étapes

La comparaison des trois approches de modélisation conduit à une conclusion centrale : les effectifs ovins et caprins constituent les déterminants structurels des émissions de GES du secteur élevage de la wilaya, avec une contribution combinée de 53,8 % au pouvoir prédictif du modèle Random Forest, cohérente avec la structure historiquement ovine du cheptel de Djelfa. Le modèle OLS demeure l’outil de quantification le plus précis (MAPE = 0,03 %), ce qui n’est pas le signe d’un sur-ajustement mais le reflet direct de la structure linéaire inhérente à la méthodologie GIEC Tier 1 : les émissions sont par construction une fonction linéaire des effectifs multipliés par des facteurs d’émission constants, de sorte qu’un modèle linéaire ne peut que converger vers un ajustement quasi parfait sur des données calculées selon cette même logique.

Le résultat le plus instructif concerne cependant l’échec relatif du modèle RF Tier 2 enrichi de variables environnementales (NDVI, précipitations, LST), dont le R^2 LOO se dégrade par rapport au modèle de base (0,780 contre 0,820). Trois explications complémentaires permettent d’interpréter ce résultat : (i) la malédiction de la dimensionnalité, $n = 23$ observations pour 9 variables ne permettant pas au modèle d’apprendre des interactions robustes ; (ii) la structure Tier 1 des émissions elle-même, qui ne laisse aux variables climatiques aucun levier direct sur la variable cible – elles agissent sur les effectifs, non sur les émissions calculées ; et (iii) un effet médiateur des effectifs, le NDVI et les précipitations influençant les émissions de manière indirecte via leur effet sur la disponibilité fourragère, la mortalité et la réforme des animaux.

Ce mécanisme de médiation – climat $\rightarrow$ pâturages $\rightarrow$ effectifs $\rightarrow$ émissions – fonde une architecture de modélisation en deux étapes plus rigoureuse que l’approche directe testée ici : une première étape prédirait les effectifs à partir des variables climatiques (effectifs = $f(\text{NDVI}, \text{précipitations}, \text{LST}, \text{tendance})$), une seconde étape appliquerait les

facteurs d'émission GIEC aux effectifs ainsi prédits (émissions = $f(\text{effectifs prédits})$). Une telle architecture permettrait notamment de simuler des scénarios de sécheresse et d'en estimer l'impact sur les émissions, ce que l'architecture à régression directe testée dans ce travail ne peut pas capturer – comme l'illustre l'anomalie de la campagne 2021/22, pour laquelle le RF de base surestime les émissions de +43,3 % faute d'avoir pu anticiper le choc exogène de la sécheresse.

5.2 Cohérence spatiale entre pression pastorale, dégradation et émissions

La cartographie spatiale (Chapitre 4) apporte un éclairage complémentaire à cette lecture statistique. La superposition qualitative des cartes de NDVI 2025 (Figure 3.3), d'occupation du sol (Figure 3.5) et de concentration en méthane (Figure 3.6) fait apparaître une cohérence spatiale notable : les foyers de plus forte concentration en CH_4 se situent dans les mêmes secteurs nord-ouest de la wilaya que les zones de plus forte densité bâtie/agricole et de NDVI relativement élevé, suggérant que ces secteurs concentrent à la fois la population animale, l'activité humaine et donc la pression sur les ressources. À l'inverse, les deux foyers de dégradation nette identifiés par la carte ΔNDVI (Figure 3.4) se situent dans des secteurs de transition agro-steppique, cohérents avec les transitions Steppe $\rightarrow$ Agriculture et Steppe $\rightarrow$ Sol nu quantifiées par le bilan LULUCF.

Cette triangulation entre statistiques d'effectifs, télédétection du couvert végétal et données atmosphériques satellitaires constitue une validation indépendante partielle de l'inventaire *bottom-up* réalisé à partir des seules statistiques DSA, renforçant la crédibilité du diagnostic d'ensemble malgré les limites propres à chaque source.

5.3 Intégration du bilan LULUCF

L'intégration du volet LULUCF permet de compléter le bilan AFOLU de la wilaya au-delà du seul sous-secteur de l'élevage. Le bilan net de $-9,05 \text{ MtCO}_2$ sur 15 ans (soit $-0,60 \text{ MtCO}_2/\text{an}$) traduit une dégradation nette des parcours steppiques, la conversion de steppe en sol nu (129 378 ha) dominant largement les dynamiques inverses de reverdissement (25 041 ha de sol nu reconverti en steppe). Ce résultat souligne que la gestion des parcours constitue un levier d'atténuation potentiellement aussi important que la seule régulation des effectifs animaux, les deux dimensions étant par ailleurs liées par le mécanisme de médiation climatique décrit en Section 4.1.

5.4 Limites et perspectives

Les principales limites de cette étude sont : la taille restreinte de l'échantillon disponible pour la validation croisée ($n = 23$), qui contraint le nombre de variables exploitables sans risque de sur-ajustement ; l'absence de données zootechniques locales (poids vif, digestibilité, ration alimentaire détaillée par saison) qui limiterait un passage à un Tier 2 complet pour l'ensemble des espèces ; l'absence de données d'effectifs ruminants pour les deux dernières campagnes (2023/2024–2024/2025) ; et la résolution spatiale et temporelle des produits de télédétection mobilisés (30 m pour Landsat, 500 m pour MODIS), susceptible de lisser certaines dynamiques fines du couvert steppique.

Les perspectives de poursuite de ce travail incluent : (i) le développement effectif de l'architecture de modélisation en deux étapes esquissée en Section 4.1 ; (ii) l'extension du bilan LULUCF aux campagnes les plus récentes par analyse multitemporelle Landsat/Sentinel-2 à plus haute résolution ; et (iii) la collecte de données zootechniques locales pour un passage à un Tier 2 complet sur l'ensemble des espèces, condition d'un inventaire territorial pleinement conforme aux exigences les plus précises des Lignes directrices du GIEC.

Conclusion générale

Ce mémoire avait pour objectif de quantifier l’ampleur et la dynamique des émissions de gaz à effet de serre du secteur AFOLU de la Wilaya de Djelfa, et d’évaluer dans quelle mesure les facteurs climatiques et la dynamique du couvert végétal permettent d’expliquer cette trajectoire – la problématique formulée au Chapitre 1.

Sur le plan quantitatif, l’inventaire GES réalisé selon les Lignes directrices du GIEC Tier 1 et Tier 2 constitue la première base de données longitudinale couvrant 26 campagnes agricoles (1999/2000–2024/2025) pour cette wilaya, bien que les deux dernières campagnes restent incomplètes faute de données d’effectifs ruminants. Les émissions issues de la fermentation entérique ovine dominant structurellement les bilans, le troupeau ovien représentant à lui seul plus de 50 % du total des émissions en tCO₂e. La rupture structurelle de 2021/22, liée à l’effondrement des effectifs ovins lors d’une sécheresse sévère, illustre la sensibilité du secteur aux aléas climatiques.

Sur le plan méthodologique, la comparaison des trois approches de modélisation démontre la robustesse de l’approche linéaire pour reproduire les émissions calculées par la méthodologie GIEC, et la valeur diagnostique du Random Forest pour identifier les déterminants structurels et révéler le mécanisme de médiation climat → effectifs → émissions.

Sur le plan spatial, l’analyse NDVI diachronique, la cartographie de l’occupation du sol, des concentrations atmosphériques de CH₄ par Sentinel-5P et le bilan LULUCF fournissent des données de référence indépendantes qui corroborent et enrichissent les résultats de l’inventaire *bottom-up*, en révélant notamment une dégradation nette des parcours steppiques au profit du sol nu sur la période 2005–2020.

Au regard des engagements climatiques de l’Algérie dans le cadre de l’Accord de Paris, ces résultats ouvrent des perspectives concrètes pour la définition de procédures d’atténuation ciblées : gestion durable des parcours steppiques, amélioration de la qualité fourragère, régulation des effectifs en période de sécheresse, et renforcement des capacités de monitoring territorial par télédétection. La poursuite de ces travaux devra s’orienter vers le développement de l’architecture de modélisation en deux étapes proposée, l’intégration complète du volet *Terres* sur l’ensemble de la période d’étude, et la collecte de données zootechniques locales pour un passage effectif à un Tier 2 généralisé, conformément aux ambitions de l’inventaire national algérien des GES.

Bibliographie

- [1] Allangawi, A., Alzaimoor, E. F. H., Shanaah, H. H., et al. (2023). Carbon Capture Materials in Post-Combustion : Adsorption and Absorption-Based Processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109-125.
- [2] Avar, C., Tumuk, D., Yuzbasioglu, A. E., & Gezerman, A. O. (2022). The Role of the Merseburg Process in Industrial Decarbonisation and Waste Evaluation. *Kemija u Industriji*, 71(11-12), 689-698.
- [3] Baninait, D., Dermeikait, K., & Antanaitis, R. (2022). Global Warming and Dairy Cattle : How to Control and Reduce Methane Emission. *Animals*, 12(19), 2687.
- [4] Bastin, J.-F., Finegold, Y., Garcia, C. A., et al. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76-79.
- [5] Bekele, W., Guinguina, A., Zegeye, A., Simachew, A., & Ramin, M. (2022). Contemporary Methods of Measuring and Estimating Methane Emission from Ruminants. *Methane*, 1(2), 82-95.
- [6] Ben-Ahmed, K., & Ben-Salha, O. (2024). Assessing the spillover effects of various forms of energy on CO2 emissions. *Heliyon*, 10(6), e27891.
- [7] Benmedjahed, M., Maouedj, R., & Mouhadjer, S. (2020). Wind energy resource assessment of desert sites in Algeria. *Energy Reports*, 6, 145-158.
- [8] Black, J., Davison, T., & Box, I. (2021). Methane Emissions from Ruminants in Australia : Mitigation Potential and Applicability of Mitigation Strategies. *Animals*, 11(4), 951.
- [9] Bouregba, H., Hachemi, M., Samatar, A. M., et al. (2024). Feasibility study of a grid-connected PV/wind hybrid energy system for an urban dairy farm. *Heliyon*, 10(7), e28701.
- [10] Bouznit, M., Pablo-Romero, M., & Sánchez-Braza, A. (2020). Measures to Promote Renewable Energy for Electricity Generation in Algeria. *Sustainability*, 12(16), 6468.
- [11] Callegaro, S., Niero, G., Penasa, M., Finocchiaro, R., Invernizzi, G., & Cassandro, M. (2022). Greenhouse gas emissions, dry matter intake and feed efficiency of young Holstein bulls. *Italian Journal of Animal Science*, 21(1), 1015-1025.

-
- [12] Chettah, S., & Amar, N. N. (2021). Towards a Sustainable Transport in Algeria : The Requisite of Energy Transition in the Road Transport Sector. *Transportation Research Procedia*, 55, 123-130.
 - [13] Chowdhuri, A., & Gupta, C. K. (2023). Gauging the Assessment of Some Anthropogenic Factors Driving Climate-Change. *Current World Environment*, 18(2), 45-58.
 - [14] Dammann, F., & Ferrari, G. (2024). A Stationary Equilibrium Model of Green Technology Adoption with Endogenous Carbon Price. *Journal of Environmental Economics and Management*, 125, 102-118.
 - [15] Dong, N., Dechant, B., Wang, H., Wright, I., & Prentice, I. (2023). Global leaf-trait mapping based on optimality theory. *Global Ecology and Biogeography*, 32(6), 876-895.
 - [16] Ferkoul, M., & Djeddi, M. (2024). Carbon emissions and economic growth in Algeria : An empirical analysis. *Energy Strategy Reviews*, 53, 101-115.
 - [17] Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., et al. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645-11650.
 - [18] Gui, Y., Wang, H., & Liu, J. (2021). The Paris Agreement and global climate governance. *Climate Policy*, 21(5), 567-582.
 - [19] Habiba, M., & Cao, S. (2022). The role of renewable energy in reducing CO2 emissions. *Energy Economics*, 115, 106-119.
 - [20] Haddoum, S., Bouznit, M., & Pablo-Romero, M. (2018). Algeria's intended nationally determined contribution. *Energy Policy*, 123, 432-441.
 - [21] Hamitouche, M., et al. (2024). Climate vulnerability in Mediterranean Algeria. *Regional Environmental Change*, 24(2), 67-82.
 - [22] Huang, Y., et al. (2022). Agricultural emissions in Algeria : trends and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131-145.
 - [23] Ishikawa, T., & Okubo, M. (2016). The Kyoto Protocol : Achievements and limitations. *Environmental Policy and Governance*, 26(4), 287-301.
 - [24] Khosravi, A., et al. (2024). REDD+ and climate change mitigation. *Forest Policy and Economics*, 162, 103-118.
 - [25] Kristiansen, S., et al. (2020). Livestock and greenhouse gas emissions. *Animal Frontiers*, 10(4), 20-27.
 - [26] Larson, J. F., et al. (2008). The principle of common but differentiated responsibilities. *International Environmental Agreements*, 8(2), 111-127.
 - [27] Makhoulfi, S., & Louafi, I. (2023). Building sector emissions in Algeria. *Energy and Buildings*, 295, 113-127.

-
- [28] Merabtene, T., et al. (2021). Forest degradation in North Africa. *Journal of Arid Environments*, 188, 104-117.
 - [29] Mohammed, T., & Al-Amin, A. (2018). Climate change and water resources in Algeria. *Water Resources Management*, 32(12), 4021-4038.
 - [30] Mounesh, M., et al. (2024). A Review on Global Warming. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 4(3), 112-125.
 - [31] Naus, S., Maasackers, J., Gautam, R., et al. (2023). Assessing the Relative Importance of Satellite-Detected Methane Superemitters in Algeria. *Environmental Science and Technology*, 57(18), 7255-7264.
 - [32] Nunes, L. J. R. (2023). The Rising Threat of Atmospheric CO₂ : A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. *Environments*, 10(3), 45.
 - [33] Ozdamirova, E., & Chankaeva, A. (2022). Greenhouse gas emissions and global warming. *Environmental Research Letters*, 17(4), 044-056.
 - [34] Qian, X., & Li, Y. (2020). The UNFCCC and international climate governance. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 22(4), 501-516.
 - [35] Redjeb, A., et al. (2021). Electricity generation in Algeria : fossil fuel dependence. *Energy Policy*, 152, 112-126.
 - [36] Redouane, A., et al. (2018). Fertilizer industry emissions in Algeria. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(36), 36001-36012.
 - [37] Ren, Z., et al. (2022). Carbon dioxide concentrations and climate change. *Atmospheric Environment*, 280, 119-132.
 - [38] Romano, A., et al. (2015). Principles of international environmental law. *Environmental Law Review*, 17(3), 205-221.
 - [39] Ruppel, O. C. (2021). The UNFCCC and the Paris Agreement. *International Journal of Climate Change*, 13(2), 45-62.
 - [40] Sidana, N. (2024). Global greenhouse gas emissions trends. *Climate Change Economics*, 15(1), 1-22.
 - [41] Singh, P., et al. (2021). The Paris Agreement : progress and challenges. *Climate Policy*, 21(8), 1015-1030.
 - [42] Spawn, S. A., et al. (2020). NASA ORNL biomass carbon density data. *Oak Ridge National Laboratory*, v1.
 - [43] Su, Y., & Wang, H. (2022). Renewable energy and carbon reduction. *Sustainability*, 14(10), 5987.
 - [44] Sun, H., Liu, Q., Li, Y., & Liu, M. (2023). Factors Influencing Carbon Emissions of Assembled Building Construction Enterprises. *Journal of Sustainable Development and Green Buildings*, 12(3), 45-58.

-
- [45] Sutikno, S., Royali, A. S., Sholiha, F. U., & Suliswanto, M. S. W. (2024). Investigating the Impact of Economic Growth on Pollution Index in Emerging Market Countries. *Journal of Human Earth and Future*, 5(2), 134-147.
 - [46] Tao, Z., & Xu, J. (2019). Carbon-Regulated EOQ Models with Consumers' Low-Carbon Awareness. *Sustainability*, 11(7), 2045.
 - [47] Thakur, S., & Solanki, H. (2022). Role of methane in climate change and options for mitigation. *International Association of Biologicals and Computational Digest*, 1(2), 78-86.
 - [48] Tsai, W. (2020). Carbon Emission Reduction Carbon Tax, Carbon Trading, and Carbon Offset. *Energies*, 13(22), 5987.
 - [49] Tubiello, F., Salvatore, M., Rossi, S., Ferrara, A., Fitton, N., & Smith, P. (2013). The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters*, 8(1), 015-029.
 - [50] Vaz, S., Souza, A. P. R. d., & Baêta, B. E. L. (2022). Technologies for carbon dioxide capture : A review applied to energy sectors. *Cleaner Engineering and Technology*, 11, 100-115.
 - [51] Wei, H.-H., Skibniewski, M., et al. (2014). Benefit-Cost Analysis of the Seismic Risk Mitigation. *Procedia Engineering*, 85, 536-542.
 - [52] Xing, Y., & Wang, X. (2024). Impact of Agricultural Activities on Climate Change : A Review of Greenhouse Gas Emission Patterns in Field Crop Systems. *Plants*, 13(4), 524.
 - [53] Youngmark, E. C., & Kraft, J. (2025). Milk Fatty Acids as Potential Biomarkers of Enteric Methane Emissions in Dairy Cattle : A Review. *Animals*, 15(3), 412.
 - [54] Zahraoui, Y., Khan, M. R. B., Alhamrouni, I., Mekhilef, S., & Ahmed, M. E. (2021). Current Status, Scenario, and Prospective of Renewable Energy in Algeria : A Review. *Energies*, 14(18), 5874.
 - [55] Zhao, Q., Yu, P., Mahendran, R., et al. (2022). Global climate change and human health : Pathways and possible solutions. *Eco-Environment & Health*, 1(2), 85-98.
 - [56] Zhou, Z. (2024). A literature review about the impact of solar radiation, greenhouse gases and oceans on the earth's climate system. *Theoretical and Natural Science*, 56, 112-123.
 - [57] Zittis, G., Hadjinicolau, P., Klangidou, M., Proestos, Y., & Lelieveld, J. (2019). A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, 19(8), 2521-2535.
 - [58] Zong, J., Sun, L., & Bao, W. (2020). Present status and development suggestions of carbon emission permit trading. *IOP Conference Series : Earth and Environment*, 546, 022-035.

- [59] Zou, H., Xiao, J., Lou, Y., Liao, D., Deng, H., & Jiang, J. (2024). A low-carbon supply chain pricing mechanism considering CSR under carbon cap-and-trade policy. *PLoS ONE*, 19(3), e0298732.

Annexe A

Annexes

A.1 Annexe A : Script Google Earth Engine (GEE)

Le script ci-dessous a été utilisé pour la classification de l'occupation du sol et l'extraction de la matrice de transition LULUCF entre 2005 et 2020 pour la Wilaya de Djelfa. Il utilise les données MODIS MCD12Q1 (IGBP classification).

```
1 // =====
2 // SCRIPT GEE - LULC TRANSITION USING MODIS (2005 vs 2020)
3 // Wilaya de Djelfa
4 // =====
5
6 // 1. GET ADMINISTRATIVE BOUNDARY (Wilaya de Djelfa)
7 // Try FAO GAUL dataset
8 var algeria = ee.FeatureCollection('FAO/GAUL/2015/level1')
9   .filter(ee.Filter.eq('ADMO_NAME', 'Algeria'));
10
11 var djelfa = algeria.filter(ee.Filter.eq('ADM1_NAME', 'Djelfa'));
12 var region = djelfa.geometry();
13
14 // Fallback: manual bounding box for Djelfa
15 region = ee.Algorithms.If(
16   djelfa.size().gt(0),
17   region,
18   ee.Geometry.Rectangle([2.5, 33.5, 4.5, 35.5])
19 );
20 region = ee.Geometry(region);
21 print('Study region:', region);
22
23 // 2. LOAD MODIS LAND COVER (MCD12Q1) - IGBP classification
24 var modisCol = ee.ImageCollection('MODIS/051/MCD12Q1')
25   .select('Land_Cover_Type_1');
26
27 // If 051 fails, try 061
```

```

28 var lc2005 = modisCol.filterDate('2005-01-01', '2005-12-31').first();
29 var lc2020 = modisCol.filterDate('2020-01-01', '2020-12-31').first();
30
31 if (lc2005 === null || lc2020 === null) {
32   print('Trying MODIS 061...');
33   modisCol = ee.ImageCollection('MODIS/061/MCD12Q1')
34     .select('LC_Type1');
35   lc2005 = modisCol.filterDate('2005-01-01', '2005-12-31').first();
36   lc2020 = modisCol.filterDate('2020-01-01', '2020-12-31').first();
37 }
38
39 print('MODIS 2005:', lc2005);
40 print('MODIS 2020:', lc2020);
41
42 // 3. RECLASSIFY into 5 broad classes
43 // IGBP codes: 1-5 Forest, 6-10 Shrub/Grass, 12-14 Cropland, 16 Bare, 13
   Urban
44 function reclassify(img) {
45   return img.remap(
46     [1,2,3,4,5,    6,7,8,9,10,    12,13,14,    16,    13],
47     [1,1,1,1,1,    2,2,2,2,2,    3,3,3,    4,    5]
48   ).rename('class');
49 }
50
51 var class2005 = reclassify(lc2005);
52 var class2020 = reclassify(lc2020);
53
54 // 4. COMPUTE AREA PER CLASS (2005) using frequency histogram
55 var hist2005 = class2005.reduceRegion({
56   reducer: ee.Reducer.frequencyHistogram(),
57   geometry: region,
58   scale: 500,
59   maxPixels: 1e13
60 });
61
62 var classHist = ee.Dictionary(hist2005.get('class'));
63 var pixelArea = ee.Image.pixelArea().clip(region);
64
65 function getAreaPerClass(classVal) {
66   var count = ee.Number(classHist.get(ee.String(classVal)));
67   var area_m2 = count.multiply(ee.Number(pixelArea.reduceRegion({
68     reducer: ee.Reducer.mean(),
69     geometry: region,
70     scale: 500,
71     maxPixels: 1e13
72   })).get('area'));
73   return area_m2.divide(10000);

```

```

74 }
75
76 var classNames = ['Foret', 'Prairie/Steppe', 'Agriculture', 'Sol nu', '
    Urbain'];
77 for (var i = 1; i <= 5; i++) {
78     var area = getAreaPerClass(i);
79     print('Area for class ' + classNames[i-1] + ' (ha):', area);
80 }
81
82 // 5. COMPUTE TRANSITION MATRIX (2005 -> 2020)
83 var changeMap = class2005.multiply(100).add(class2020).rename('
    transition');
84 var transHist = changeMap.reduceRegion({
85     reducer: ee.Reducer.frequencyHistogram(),
86     geometry: region,
87     scale: 500,
88     maxPixels: 1e13
89 });
90
91 var transDict = ee.Dictionary(transHist.get('transition'));
92 var transKeys = transDict.keys();
93
94 transKeys.map(function(key) {
95     var code = ee.Number.parse(key);
96     var oldClass = code.divide(100).floor();
97     var newClass = code.subtract(oldClass.multiply(100));
98     var oldName = classNames[oldClass.subtract(1)];
99     var newName = classNames[newClass.subtract(1)];
100     var count = ee.Number(transDict.get(ee.String(key)));
101     var area_m2 = count.multiply(ee.Number(pixelArea.reduceRegion({
102         reducer: ee.Reducer.mean(),
103         geometry: region,
104         scale: 500,
105         maxPixels: 1e13
106     })).get('area')));
107     var area_ha = area_m2.divide(10000);
108     print('Transition ' + oldName + ' -> ' + newName + ' (ha):', area_ha);
109 });
110
111 // 6. VISUALISE MAPS
112 Map.centerObject(region, 8);
113 Map.addLayer(class2005, {min:1, max:5, palette: ['darkgreen', '
    yellowgreen', 'orange', 'brown', 'red']}, 'LULC 2005');
114 Map.addLayer(class2020, {min:1, max:5, palette: ['darkgreen', '
    yellowgreen', 'orange', 'brown', 'red']}, 'LULC 2020');

```

Listing A.1: Script GEE pour l'analyse LULUCF

A.2 Annexe B : Script Python pour le traitement des données et le bilan LULUCF

Le script Python ci-dessous a été utilisé pour traiter les effectifs animaux, calculer les émissions GES selon la méthodologie GIEC, et réaliser le bilan LULUCF à partir de la matrice de transition extraite de GEE.

```

1 # =====
2 # SCRIPT PYTHON - INVENTAIRE GES AFOLU ET BILAN LULUCF
3 # Wilaya de Djelfa (1999-2025)
4 # =====
5
6 import pandas as pd
7 import numpy as np
8 import matplotlib.pyplot as plt
9
10 # --- 1. CHARGEMENT DES DONNEES ---
11 # Donnees des effectifs animaux (ovins, bovins, caprins, camelins)
12 df = pd.read_csv('effectifs_djelfa.csv', index_col=0) # Annees en index
13
14 # Facteurs d'emission (GIEC Tier 1 et Tier 2)
15 FE_ent = {'Ovin': 6.88, 'Bovin': 50.0, 'Caprin': 5.0, 'Camelin': 46.0}
16 FE_fum = {'Ovin': 0.15, 'Bovin': 1.0, 'Caprin': 0.17, 'Camelin': 2.1}
17 N_excret = {'Ovin': 1.2, 'Bovin': 40.0, 'Caprin': 1.3, 'Camelin': 15.0}
18
19 GWP_CH4 = 28
20 GWP_N2O = 265
21 FE_N2O = 0.01
22 CONV_FACTOR = 44/28
23
24 # --- 2. CALCUL DES EMISSIONS ---
25 species = ['Ovin', 'Bovin', 'Caprin', 'Camelin']
26 ch4_ent = np.zeros(len(df))
27 ch4_fum = np.zeros(len(df))
28 n2o_pat = np.zeros(len(df))
29
30 for i, species_name in enumerate(species):
31     ch4_ent += df[species_name] * FE_ent[species_name]
32     ch4_fum += df[species_name] * FE_fum[species_name]
33     n2o_pat += df[species_name] * N_excret[species_name]
34
35 n2o_pat = n2o_pat * FE_N2O * CONV_FACTOR
36
37 total_CH4 = ch4_ent + ch4_fum
38 total_N2O = n2o_pat
39

```

```

40 emissions_tC02e = (total_CH4 / 1000 * GWP_CH4) + (total_N2O / 1000 *
    GWP_N2O)
41
42 # --- 3. BILAN LULUCF ---
43 # Matrice de transition (issue de GEE)
44 # Transition: De -> A, Superficie (ha)
45 transitions = {
46     ('Prairie/Steppe', 'Agriculture'): 13418.66,
47     ('Prairie/Steppe', 'Sol nu'): 129378.42,
48     ('Prairie/Steppe', 'Urbain'): 20.58,
49     ('Agriculture', 'Prairie/Steppe'): 10168.38,
50     ('Sol nu', 'Prairie/Steppe'): 25041.10
51 }
52
53 # Stocks de carbone par classe (tC/ha)
54 C_stocks = {
55     'Prairie/Steppe': 39,
56     'Agriculture': 28,
57     'Sol nu': 15.7,
58     'Urbain': 10,
59     'Foret': 68
60 }
61
62 delta_C_total = 0
63 print("\n--- Bilan LULUCF ---")
64 print("Transition\t\tSurface (ha)\tDelta C (tC/ha)\tDelta C total (tC)\t
    tDelta C02 (tC02)")
65 for (from_class, to_class), area in transitions.items():
66     delta_C = C_stocks[to_class] - C_stocks[from_class]
67     delta_C_tot = delta_C * area
68     delta_C02 = delta_C_tot * 44/12
69     delta_C_total += delta_C_tot
70     print(f"{from_class} -> {to_class}\t\t{area:,.2f}\t\t{delta_C:.1f}\t
    \t{delta_C_tot:,.0f}\t\t{delta_C02:,.0f}")
71
72 delta_C02_total = delta_C_total * 44/12
73 print(f"\nBilan net LULUCF (2005-2020): {delta_C02_total:,.0f} tC02")
74 print(f"Bilan net LULUCF moyen annuel: {delta_C02_total / 15:,.0f} tC02/
    an")
75
76 # --- 4. AFFICHAGE GRAPHIQUE ---
77 fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(14, 5))
78
79 # Emissions des l'élevage
80 ax1.plot(df.index, emissions_tC02e/1e6, 'b-', linewidth=2, label='
    Emissions elevage')
81 ax1.axvline(x=2021, color='r', linestyle='--', label='Secheresse 2021')

```

```

82 ax1.set_xlabel('Annees')
83 ax1.set_ylabel('Emissions (MtCO2e)')
84 ax1.set_title('Emissions GES de l\'elevage (Wilaya de Djelfa)')
85 ax1.legend()
86 ax1.grid(True)
87
88 # Bilan LULUCF (barres)
89 trans_names = [f"{f}->{t}" for (f,t) in transitions.keys()]
90 trans_values = [(C_stocks[t] - C_stocks[f]) * area * 44/12 for ((f,t),
    area) in transitions.items()]
91 colors = ['red' if v < 0 else 'green' for v in trans_values]
92 ax2.barh(trans_names, trans_values, color=colors)
93 ax2.axvline(x=0, color='black', linewidth=1)
94 ax2.set_xlabel('Flux net (tCO2)')
95 ax2.set_title('Flux LULUCF par transition (2005-2020)')
96 ax2.grid(True)
97
98 plt.tight_layout()
99 plt.savefig('bilan_AFOLU.png', dpi=300)
100 plt.show()

```

Listing A.2: Script Python pour le calcul des émissions et du bilan LULUCF

A.3 Annexe C : Facteurs de stock de carbone détaillés

Le Tableau A.1 présente les stocks de carbone détaillés par classe d'occupation du sol, utilisés pour le calcul du bilan LULUCF. Les valeurs sont issues du GIEC Volume 4 (2006, révisé 2019), Tableaux 4.7, 4.9 et 6.3, adaptées aux écosystèmes méditerranéens semi-arides.

TABLE A.1 : Stocks de carbone détaillés par classe (tC/ha)

Classe	Biomasse aérienne	Biomasse souterraine	Carbone organique du sol (0-30 cm)	Total
Forêt (Pin d'Alep)	25	8	35	68
Prairie / Steppe	3	6	30	39
Agriculture	2	1	25	28
Sol nu	0,5	0,2	15	15,7
Urbain	0	0	10	10

Source : GIEC Volume 4 (2006, révisé 2019) et adaptations pour zones semi-arides nord-africaines.

A.4 Annexe D : Structure des données brutes (effectifs animaux)

Le Tableau A.2 présente un extrait des effectifs animaux utilisés pour l'inventaire GES. Les données complètes couvrent la période 1999/2000 à 2024/2025 ; les campagnes 2023/2024 et 2024/2025 ne disposent toutefois pas de données pour les ruminants (ovins, bovins, caprins, camelins), seules les filières avicole et apicole étant renseignées par la DSA sur ces deux dernières campagnes.

TABLE A.2 : Extrait des effectifs animaux par campagne agricole (têtes)

Campagne	Ovins	Bovins	Caprins	Camelins
1999/2000	2 248 500	27 400	244 600	6 800
2005/2006	2 400 000	27 300	326 000	8 170
2010/2011	2 891 800	29 200	348 370	6 330
2015/2016	3 379 000	34 400	406 000	6 200
2020/2021	4 142 800	24 580	390 500	800
2021/2022	1 941 910	16 709	228 429	789
2022/2023	2 767 541	20 388	290 424	986
2023/2024	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2024/2025	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Source : Direction des Services Agricoles (DSA) de Djelfa, Monographies 1999–2025. n.d. = non disponible.