



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالی والبحث العلمی  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université Constantine 1 Frères Mentouri  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة قسنطينة 1 الاخوة منتوري  
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département : Microbiologie

قسم : ميكروبيولوجيا

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Écologie et Environnement

Spécialité : Ecologie Microbienne

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

---

## Etude de l'impact des incendies sur les propriétés physicochimiques et microbiennes du sol

---

Présenté par : Aiouadj Fatima Zohra

Le : 11/06/2024

Torchi Nor Elhouda

Jury d'évaluation :

**Président :** CHABBI Rabah (MAA- U Constantine 1 Frères Mentouri).

**Encadrante :** LIFA Maroua (MCB - U Constantine 1 Frères Mentouri).

**Examinatrice :** DERABLI Bassema (MAB - U Constantine 1 Frères Mentouri).

Année universitaire  
2023 – 2024

# *Remerciements*

Tout d'abord, nous remercions Allah, Le Tout-Puissant, qui nous a accordé cette réussite. Nous tenons à remercier les membres du jury M. CHABBI Rabah et Mme. DERABLI Bassema pour leur présence, pour leur lecture attentive de notre mémoire.

Nous remercions profondément Mme LIFA M. pour sa précieuse aide, ces conseils et le temps qu'elle nous a accordé.

Nous tenons à témoigner notre profonde gratitude envers tous les enseignants qui ont contribué, durant ces cinq dernières années, à notre formation et à tous ceux qui nous ont aidés.

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail :

A mes chers parents (Hacene et zitouni Habiba) et je les remercie infiniment

pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien

Et leurs prières.

À mon frère Salah Eddinne, ma sœur Omiama, mon fiancé Lezhar et mon

binôme qui m'ont aidé et soutenu dans mes études et m'ont encouragé à

travailler davantage.

**Nor Elhouda**

# *Dédicace*

Je dédie humblement mon travail :

A mes parents qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mes études.

Leur amour inconditionnel a été ma force.

A mes amies et spécialement mon binôme et je les remercie pour leur soutien A

mes professeurs, merci pour vos précieux conseils qui ont enrichi mon

expérience d'apprentissage.

A tous ceux qui ont été là pour moi à chaque étape de mon parcours.

**Fatima zohra**

## **Résumé**

Cette étude bibliographique met en lumière l'impact significatif des incendies sur les écosystèmes forestiers, soulignant la menace sérieuse qu'ils représentent. Les incendies exercent une influence considérable sur les propriétés physico-chimiques des sols, altérant la matière organique en cendres et entraînant une déperdition de nutriments essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Cette transformation réduit la capacité des sols à retenir l'eau et les éléments nutritifs, ce qui entrave la croissance végétale, notamment en raison de la chaleur intense et de la combustion. En ce qui concerne les propriétés microbiologiques du sol, les incendies peuvent avoir des effets variables en fonction de la sévérité de l'incendie, du type de sol et de la régénération végétale post-incendie. Ils réduisent la biomasse microbienne, modifient la diversité et la composition des communautés microbiennes, et perturbent des fonctions clés telles que la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments, affectant ainsi la fertilité du sol. La combustion de la matière organique réduit également les réserves disponibles pour les microorganismes. Enfin, les incendies peuvent modifier la structure et la stabilité du sol, ce qui influe sur l'environnement dans lequel les microorganismes prospèrent. Néanmoins, il est important de reconnaître que les incendies peuvent également avoir des répercussions positives. Ils libèrent des nutriments et encouragent la croissance de certaines plantes et micro-organismes adaptés à la chaleur. De plus, grâce aux avancées technologiques modernes, des approches de restauration et de réhabilitation des forêts post-incendie sur le plan biologique et physico-chimique ont été explorées et mises en œuvre avec succès. Cette recherche revêt une importance multidimensionnelle, allant au-delà des domaines scientifiques pour englober des aspects environnementaux, agricoles, de développement durable et de santé publique. En comprenant mieux les impacts des incendies sur les sols forestiers et en développant des méthodes efficaces de récupération, nous pouvons contribuer à la préservation et à la gestion durable des écosystèmes forestiers, tout en répondant aux défis posés par le changement climatique et la conservation de la biodiversité.

**Mots-clés** : incendies de forêt, caractéristiques physicochimiques, microbiologie du sol, régénération post-incendie.

## ملخص

تسلط هذه الدراسة البليوغرافية الضوء على أثر الحرائق المهم على النظم البيئية الغابية، مشيرة إلى التهديد الجاد الذي تمثله. تؤثر الحرائق بشكل كبير على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة، مما يؤدي إلى تحول المواد العضوية إلى رماد وفقدان المغذيات الأساسية مثل النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم. يقلل هذا التحول من قدرة التربة على احتجاز الماء والمغذيات، مما يعيق نمو النباتات، خاصة بسبب الحرارة الشديدة والاحتراق. بالنسبة للخصائص الميكروبيولوجية للتربة، يمكن أن تكون للحرائق تأثيرات متفاوتة استناداً إلى شدة الحريق ونوع التربة والتجديد النباتي بعد الحريق. إذ تقلل من كتلة الكائنات الدقيقة وتعديل تنوع وتكوين المجتمعات الميكروبية، وتعكر وظائف رئيسية مثل تحلل المواد العضوية وإعادة تدوير المغذيات، مما يؤثر على خصوبة التربة. ويؤدي احتراق المواد العضوية أيّ ظلّي تقليل الحثبايطيات المتاحة للكائنات الدقيقة. وأخيّراً، يمكن للحرائق تغيير هيكل واستقرار التربة، مما يؤثر على البيئة التي تزدهر فيها الكائنات الدقيقة. ومع ذلك، يجب الاعتراف بأن الحرائق يمكن أيّ ظلّي تكون لها تأثيرات إيجابية. حيث تحرر المغذيات وتشجع على نمو بعض النباتات والكائنات الدقيقة المنكيفة مع الحرارة. وبفضل التقدم التكنولوجي الحديث، تم استكشاف وتنفيذ أساليب السعادة وإعادة تأهيل الغابات بعد الحريق بنجاح من الناحية البيولوجية والفيزيوكيميائية. هذا البحث ذو أهمية متعددة الأبعاد، يتجاوز المجالات العلمية ليشمل الجوانب البيئية والزراعية والتنمية المستدامة والصحة العامة. من خلال فهم أفضل أثار الحرائق على التربة الغابية وتطوير أساليب فعالة للاستعادة، يمكننا المساهمة في الحفاظ على إدارة النظم البيئية الغابية بشكل مستدام، مع التصدي لتحديات التغير المناخي وحفظ التنوع البيولوجي.

كلمات مفتاحية: حرائق الغابات، الخصائص الفيزيوكيميائية، ميكروبيولوجيا التربة، التجديد بعد الحرائق

## **Abstract**

This bibliographic study highlights the significant impact of fires on forest ecosystems, underscoring the serious threat they pose. Fires exert a considerable influence on the physico-chemical properties of soils, transforming organic matter into ash and causing a loss of essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium. This transformation reduces the soil's ability to retain water and nutrients, which hinders plant growth, especially due to intense heat and combustion. Regarding the soil's microbiological properties, fires can have variable effects depending on the severity of the fire, the soil type, and post-fire vegetation regeneration. They reduce microbial biomass, alter the diversity and composition of microbial communities, and disrupt key functions such as organic matter decomposition and nutrient recycling, thus affecting soil fertility. The combustion of organic matter also reduces the available reserves for microorganisms. Additionally, fires can alter soil structure and stability, affecting the environment in which microorganisms thrive. However, it is important to recognize that fires can also have positive effects. They release nutrients and encourage the growth of certain heat-adapted plants and microorganisms. Moreover, due to modern technological advancements, approaches for the biological and physico-chemical restoration and rehabilitation of post-fire forests have been explored and successfully implemented. This research holds multidimensional importance, extending beyond scientific fields to encompass environmental, agricultural, sustainable development, and public health aspects. By better understanding the impacts of fires on forest soils and developing effective recovery methods, we can contribute to the preservation and sustainable management of forest ecosystems while addressing the challenges posed by climate change and biodiversity conservation.

**Keywords:** forest fires, physico-chemical characteristics, soil microbiology, post-fire regeneration.



## Liste des abréviations

**ADN** : Acide Désoxyribonucléique

**AFB** : Alliance Forêts Bois

**Al<sup>3+</sup>**: aluminium

**Ca<sup>2+</sup>** : calcium

**CNRF** : Centre national de  
la recherche scientifique

**CO<sub>2</sub>** : dioxyde de carbone

**Cm** : centimètre

**Cu** : Cuivre

**DGF** : la Direction générale des Forêts

**DES** : Dark Septate Endophytes

**EPS** : Exo-polysaccharides

**ETM** : éléments traces métalliques

**FAO** : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

**Fe<sup>2+</sup>**: fer ferreux

**Fe<sup>3+</sup>**: fer ferrique

**G+C** : Guanine + Cytosine

**H<sup>+</sup>**: ions hydrogène

**HAP** : hydrocarbures aromatiques polycycliques

**Ha** : hectare

**IFRC** : Fédération des sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge( en anglais)

**MA** : Les champignons mycorhiziens à arbuscules

**MEDD** : Ministère de l'Écologie et du Développement durable

**Mg<sup>2+</sup>** : magnésium

**MOM** : matières organiques mortes

**MO** : matière organique

**MOS** : la matière organique des sols

## Liste des abréviations

**Mn** : Manganèse

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>**: ammonium

**OEB** : Organisation européenne des brevets

**OMPE** : Organisation Mondiale pour la Protection de l'Environnement

**Oreé** : Entreprises, territoires et environnement

**K<sup>+</sup>** : le potassium

**PGPR** : Plant Growth Promoting Rhizobacteria

**XXe siècle** : vingtième siècle

**Zn** : Zinc

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1.</b> Les causes des incendies de forêt à travers le temps (en %) en Algérie (Meddour-Sahar et al., 2015)..... | 6  |
| <b>Tableau 2.</b> Statistiques des incendies en Algérie de 2000 à 2023 (DGF, 2023) .....                                   | 9  |
| <b>Tableau 3.</b> Classification des Eubactériales sensu lato (Dommerglies et Mangenot, 1970)....                          | 13 |
| <b>Tableau 4.</b> Classification des Eubactériales sensu stricto (Dommerglies et Mangenot, 1970)                           | 14 |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1.</b> Contributions des ARNr 16S et des gènes ARNr 16S de divers phylums dans les bibliothèques issues des communautés bactériennes du sol (Janssen, 2006) ..... | 15 |
|---|----|

# Table des matières

Résumé

ملخص

Abstract

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction..... 1

## Chapitre 1 : les feux de forêt

|  |   |
|--|---|
| 1- Définitions.....                                      | 3 |
| 1-1-Pyrologie forestière .....                           | 3 |
| 1-2-Définition du feu .....                              | 3 |
| 1-3-Feux de forêts.....                                  | 3 |
| 2- Les différents types d'incendies de forêt.....        | 4 |
| 2-1-Les incendies de sol.....                            | 4 |
| 2-2-Les incendies de surface.....                        | 4 |
| 2-3-Les incendies de cimes .....                         | 5 |
| 3- Les principales causes des feux de forêt.....         | 5 |
| 3-1- Les causes naturelles .....                         | 5 |
| 3-2- Les causes liées aux activités humaines .....       | 7 |
| 4- Les mécanismes de propagation des feux de forêts..... | 7 |
| 5- Les statistiques des incendies forestiers .....       | 8 |
| 5-1-Dans le monde .....                                  | 8 |
| 5-2- En Algérie.....                                     | 8 |

## Chapitre 2 : la composition microbiologique et physicochimique du sol

|   |    |
|---|----|
| 1- Introduction .....                           | 11 |
| 2 -Les micro-organismes du sol.....             | 11 |
| 2-1-Les bactéries.....                          | 11 |
| 2-1-1-Classification des bactéries du sol ..... | 11 |

|  |    |
|--|----|
| 2-1-1-1- Classification phénotypique .....               | 12 |
| 2-1-1-2- Classification phylogénétique .....             | 15 |
| 2-2-Les champignons .....                                | 18 |
| 2-2-1-Les champignons saprophytes .....                  | 19 |
| 2-2-2-Les champignons mycorhiziens .....                 | 19 |
| 2-2-3-Les champignons endophytes .....                   | 20 |
| 2-2-4-Les champignons pathogènes/parasites.....          | 20 |
| 2-3-La microfaune .....                                  | 20 |
| 3- Rôle des microorganismes dans le sol.....             | 21 |
| 4-La composition physico-chimique du sol forestier ..... | 22 |
| 4-1-La porosité.....                                     | 22 |
| 4-2- La texture.....                                     | 23 |
| 4-2-1-Textures sableuses .....                           | 23 |
| 4-2-2-Textures limoneuses.....                           | 23 |
| 4-2-3-Textures argileuses.....                           | 23 |
| 4-3-Réactions d'échange .....                            | 23 |
| 4-3-1-Échanges de cations .....                          | 23 |
| 4-3-2-Échanges d'anions .....                            | 24 |
| 4-4-Le pH du sol.....                                    | 24 |

### **Chapitre 3 : L'impact des feux de forêt sur la stabilité fonctionnelle des facteurs écologiques**

|  |    |
|--|----|
| 1- L'impact des incendies sur les facteurs biotiques ..... | 25 |
| 1-1- L'impact sur la microflore du sol.....                | 25 |
| 1-2-L'impact sur la végétation forestière.....             | 26 |
| 2- L'impact des incendies sur les facteurs abiotiques..... | 28 |
| 2-1- L'impact sur la matière organique.....                | 28 |
| 2-2-L'impact sur la matière minérale.....                  | 29 |

### **Chapitre 4 : stratégies de restauration des sols post incendie**

|  |    |
|--|----|
| 1-La restauration biologique post-incendie .....   | 31 |
| 1-1-La replantation .....  | 31 |
| 1 2- l'introduction massive de microorganismes sélectionnés pour leurs activités bénéfique | 31 |
| 1-2-La restauration chimique des sols post incendie.....                                   | 31 |
| <b>Conclusion</b> .....  | 33 |
| <b>Références bibliographiques</b> .....   | 35 |

---

# *Introduction*

---

Les feux de forêt sont des incendies incontrôlés qui peuvent survenir dans des zones naturelles telles que les forêts, les prairies ou les pâturages. Ces incendies peuvent être déclenchés par des causes naturelles comme la foudre, ou par des causes humaines telles que des feux de camp non surveillés, des cigarettes jetées ou même des actes criminels (Eldridge, 2023). Les conditions météorologiques extrêmes peuvent également accroître le risque d'incendie. Il est souligné que lors de fortes chaleurs et d'un manque prolongé d'eau, une grande partie de l'eau contenue dans les tissus des plantes s'évapore, créant un mélange hautement inflammable à des températures élevées (Rigolot *et al.*, 2020).

Les incendies de forêt peuvent avoir des conséquences dévastatrices sur les environnements forestiers. Les données révèlent qu'entre 1963 et 2020, environ 1,7 million d'hectares de forêts, de maquis et de broussailles ont été ravagés par les incendies en Algérie. Les forêts algériennes sont actuellement vulnérables et nécessitent une protection renforcée, car la déforestation s'aggrave en raison des incendies récurrents (DGF, 2012).

À la différence d'autres régions du monde où une grande proportion des incendies est d'origine naturelle, principalement déclenchée par la foudre, le bassin méditerranéen se distingue par la prépondérance des incendies d'origine humaine. Les causes naturelles ne représentent qu'une fraction minimale, variant entre 1 et 5 % selon les pays, probablement en raison de l'absence de phénomènes climatiques tels que les tempêtes sèches (Alexandrian *et al.*, 1998).

Outre les dommages immédiats causés à la végétation et à la faune, les incendies de forêts ont également un impact significatif sur le sol.

Le sol est un corps naturel composé de matières minérales et organiques, différencié en horizons de différentes épaisseurs, avec des propriétés physiques, chimiques et biologiques distinctes (Marbut, Joffe, 1949). Il est considéré comme un écosystème autonome avec une organisation et une histoire propre. Il abrite une grande diversité d'organismes vivants qui en font un réservoir biologique essentiel pour la biodiversité et l'écosystème terrestre (Jenny, 1980). La richesse microbienne du sol reste largement inexplorée, mais une meilleure connaissance de cette diversité biologique permettrait une meilleure compréhension de ses fonctions et de ses implications pour l'environnement (Vencent, 2023). En tant qu'écosystème vivant et complexe, le sol est profondément influencé par les incendies de forêt, ce qui modifie ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Dans cette perspective, il est essentiel de

comprendre les interactions entre les incendies de forêt et le sol, car ces interactions peuvent avoir des implications importantes pour la régénération des écosystèmes forestiers et la santé globale des environnements forestiers.

Dans ce cadre, nous avons réalisé une revue de littérature sur les effets des incendies de forêt sur les caractéristiques microbiologiques et physico-chimiques du sol. Notre manuscrit est structuré autour de quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre propose des définitions clés du sujet de recherche, notamment la pyrologie forestière et les différents types d'incendies de forêt. Nous présentons également des statistiques mondiales et algériennes sur ce phénomène.
- Le deuxième chapitre aborde la composition microbiologique et physico-chimique du sol forestier.
- Le troisième chapitre examine l'impact des incendies sur les facteurs biotiques et abiotiques du sol.
- Le quatrième chapitre se concentre sur la restauration biologique post- incendie.

---

## *Chapitre 1 : les feux de forêt*

---

## **1- Définitions**

### **1-1-Pyrologie forestière**

Selon le Ministère des terres et forêts la pyrologie forestière est une discipline scientifique qui se concentre principalement sur l'étude des incendies de forêts et de leurs caractéristiques (MTF, 1973). Elle comprend l'explication du phénomène de combustion, la description des particularités propres aux incendies de forêts, ainsi que l'étude des facteurs qui influencent leur origine et leur propagation.

### **1-2-Définition du feu**

Le feu est une réaction exothermique qui engendre un dégagement de chaleur, de lumière et généralement des flammes lorsqu'une substance brûle. Pour que la combustion se produise, tout feu à besoin d'un gaz appelé oxygène. Lorsque l'herbe et le bois sont secs, une simple étincelle peut provoquer un incendie. C'est ainsi qu'en été, de vastes étendues de forêts sont détruites par les incendies (Charman et Delcoigne, 1994). Ces derniers résultent de la combustion des matériaux ligneux qui composent la majeure partie de la végétation forestière.

### **1-3-Feux de forêts**

D'après la Fédération des sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge (IFRC), les incendies de forêt, également connus sous le nom de feux de brousse, de feux de broussailles ou de feux de forêt, sont de grands incendies incontrôlés et potentiellement destructeurs qui peuvent se propager rapidement et causer des dommages considérables aux zones rurales et urbaines. Ces incendies peuvent changer de direction de manière imprévisible et même franchir de grandes distances lorsque les braises et les étincelles sont transportées par le vent. Ils peuvent être déclenchés par diverses causes, telles que la foudre lors de tempêtes électriques, mais aussi par la négligence humaine, comme l'abandon d'une cigarette allumée.

La propagation d'un feu de forêt dépend de plusieurs facteurs, notamment la topographie du terrain, la quantité de combustible disponible (végétation dense, bois mort) et les conditions météorologiques, notamment le vent et la chaleur. Les incendies de forêt peuvent démarrer en quelques secondes et se propager rapidement, se transformant en brasiers dangereux en seulement quelques minutes.

Selon le Ministère de l'Écologie et du Développement durable (MEDD), pour que l'inflammation et la combustion aient lieu, trois facteurs doivent être réunis, chacun dans des proportions appropriées : un combustible, qui peut être n'importe quel matériau inflammable,

une source externe de chaleur (flamme ou étincelle) et de l'oxygène, nécessaire pour entretenir le feu.

## **2- Les différents types d'incendies de forêt**

On peut distinguer trois types d'incendies de forêt et d'espaces naturels inflammables. Ils peuvent se produire simultanément dans la même zone. Ainsi, un incendie de surface peut se transformer en incendie de cime, et vice versa.

### **2-1- Les incendies de sol**

Ces incendies se réfèrent à la matière organique présente dans le sol de la litière, de l'humus ou de la tourbe, et leur propagation est lente. Bien que peu virulents, ils peuvent être très destructeurs en attaquant les systèmes souterrains des plantes. En raison de l'abandon, de nombreuses zones périphériques des forêts qui auraient pu servir de coupe-feu ont été colonisées par des formations végétales telles que des friches. Cette situation a été encore aggravée par la réduction des récoltes forestières et un mauvais entretien, ce qui a entraîné la présence de bois morts (chablis, etc.) dans les forêts et la prolifération de la végétation sous-bois. Ces feux couvants produisent une grande quantité de fumée en raison de la combustion incomplète, ce qui entraîne des émissions plus importantes de monoxyde de carbone.

Parmi les incendies de sol, on distingue les incendies de tourbe. Ces derniers se propagent dans le sol avec une faible virulence, une vitesse de propagation réduite et une longue persistance. Ils peuvent durer des mois et résister tout l'hiver sous une couche de neige (Lavolé, 2021).

### **2-2- Les incendies de surface**

Ces incendies brûlent les couches basses de la végétation, c'est-à-dire la partie supérieure de la litière, la strate herbacée et les arbustes bas. Ils se propagent généralement par rayonnement et concernent les zones de garrigue ou de landes.

La propagation d'incendie de surface peut être rapide lorsqu'ils se développent librement et que les conditions de vent ou de relief sont favorables (incendies en pente). La vitesse de propagation est d'environ 0,5 à 1 km/h (Lavolé, 2021).

Les principales contraintes de ce type d'incendie incluent :

1. Proximité des habitations isolées ou en hameau : cela augmente les risques de propagation de l'incendie aux zones habitées, mettant ainsi en danger la sécurité des personnes et des biens.

2. Présence de réserves de gaz domestique ou de stockages d'hydrocarbures : ces installations sont hautement inflammables et peuvent aggraver l'incendie en cas de flammes ou d'explosions.
3. Bâtiments agricoles et stockages de fourrage : ils contiennent souvent du matériel inflammable, comme du foin ou des engrais, susceptibles de contribuer à l'expansion de l'incendie.
4. Présence de bois et d'exploitations forestières : les forêts et les zones boisées augmentent la combustibilité de la zone, rendant l'incendie plus difficile à contrôler.
5. Présence d'obstacles au vent : les obstacles tels que les murs, les haies ou les clôtures peuvent entraver la circulation de l'air et favoriser la propagation du feu.
6. État de la récolte : les récoltes sèches sont plus inflammables et peuvent servir de combustible supplémentaire à l'incendie.
7. Présence d'engins agricoles : les engins agricoles, tels que les tracteurs, peuvent compliquer l'accès des secours et entraver leurs efforts pour maîtriser l'incendie (Lavalé, 2021).

Il est également important de prendre en compte la diversité des caractéristiques des feux en fonction du type de végétation, la surface plane, l'uniformité de la végétation sur de grandes surfaces et le risque de propagation à des tiers tels que les exploitations agricoles, les élevages ou encore les éoliennes. La présence de badauds peut également rendre difficile l'accès au sinistre et entraver l'action des secours. L'ensemble de ces facteurs doit être pris en compte lors de la gestion de ce type d'incendie pour assurer une intervention efficace (Lavalé, 2021).

### **2-3-Les incendies de cimes**

Les incendies de cimes se propagent dans la partie supérieure des arbres, formant une couronne de feu. Ils libèrent généralement de grandes quantités d'énergie et se propagent à une vitesse très élevée. Ils sont encore plus intenses et difficiles à contrôler lorsque le vent est fort et la végétation sèche (Lavalé, 2021).

## **3- Les principales causes des feux de forêt**

### **3-1- Les causes naturelles**

Selon l'Organisation Mondiale pour la Protection de l'Environnement (OMPE), il y'a quelques centaines d'années, les incendies de forêt étaient principalement causés par des phénomènes naturels rares tels que des éruptions volcaniques ou des tremblements de terre, qui se produisaient dans des zones géographiques spécifiques. Aujourd'hui, ce ne sont plus ces

phénomènes naturels qui sont à l'origine des feux de forêt, mais la foudre reste toujours la principale responsable des départs de feux de forêt d'origine naturelle. Dans certaines régions du pays, environ 25 % des départs de feux de forêt sont dus aux orages et à la foudre, en l'absence de pluie. Il peut également y avoir des circonstances exceptionnelles et des phénomènes inhabituels, tels que la collision de deux roches siliceuses créant une étincelle, qui peuvent avoir un impact sur les incendies (OMPE, 2019).

Les incendies d'origine naturelle sont souvent rapidement maîtrisés car ils ont généralement un seul foyer.

### 3-2- Les causes liées aux activités humaines

Aujourd'hui, les origines naturelles des incendies de forêt sont devenues moins courantes, laissant la place aux activités humaines, qu'elles soient volontaires ou accidentelles. Environ 43 % des incendies déclenchés par l'homme sont dus à des comportements imprudents tels que l'abandon de mégots de cigarettes, le dépôt d'ordures ou des feux de broussailles non maîtrisés. Par ailleurs, les incendies peuvent être déclenchés par des surtensions électriques, des dommages aux lignes électriques ou des incidents militaires. Enfin, les activités récréatives, agricoles ou forestières contribuent souvent aux incendies en raison d'un manque de prudence, représentant environ 55 % des cas (OMPE, 2019).

En Algérie, les causes des incendies de forêt ont été étudiées par plusieurs auteurs dans le passé (Gravius, 1866 ; Thibault, 1866 ; Marc, 1916 ; IIA, 1933 ; Boudy, 1952), qui ont montré que ces incendies sont principalement liés aux pratiques agricoles et pastorales des populations locales (Boudy, 1952). Les données récentes sur les causes des incendies sont rares, mais selon les informations officielles, environ 80 % des incendies sont d'origine inconnue (tableau 1).

**Tableau 1.** Les causes des incendies de forêt à travers le temps (en %) en Algérie (Meddour-Sahar et al., 2015)

| <i>Causes</i>          | 1866-1915      | 1886-1945       | 1979-1982       | 1985-2010                          |
|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|
|                        | Marc<br>(1916) | Boudy<br>(1952) | Rebai<br>(1982) | Meddour-Sahar et<br>Derridj (2012) |
| <i>Accidentelles</i>   | 8              | -               | -               | 1                                  |
| <i>Imprudences</i>     | 32             | 50              | 27              | 3                                  |
| <i>Intentionnelles</i> | 23             | 20              | 16              | 16                                 |
| <i>Inconnues</i>       | 37             | 30              | 57              | 80                                 |

#### 4- Les mécanismes de propagation des feux de forêts

La propagation des incendies de forêt est principalement due aux transferts thermiques qui se produisent entre les sources de chaleur (flamme, braises, etc.) et le combustible non brûlé. Ces transferts thermiques portent le combustible non brûlé à une température d'allumage, qui se situe généralement autour de 300 °C. À cette température, le combustible commence à dégager des gaz inflammables par le processus de pyrolyse. Ces gaz réagissent ensuite avec l'oxygène de l'air, produisant une grande quantité de chaleur, ce qui entraîne la combustion des flammes. Cette combustion à son tour fournit une source d'énergie pour chauffer le combustible non brûlé, permettant ainsi la propagation continue du feu (Jappiot *et al.*, 2009).

La vitesse à laquelle cette zone de combustion se propage est appelée la vitesse du feu. L'intensité du feu, c'est-à-dire l'énergie libérée par le feu, dépend à la fois de sa vitesse de propagation et de la quantité de combustible disponible pour soutenir le feu. Plus la vitesse du feu est élevée et plus la quantité de combustible est importante, plus l'intensité du feu sera élevée (Jappiot *et al.*, 2009).

Il est important de comprendre les mécanismes de propagation des incendies de forêt afin de mieux prévenir et combattre ces catastrophes naturelles aux conséquences dévastatrices. Les principaux mécanismes de transfert de chaleur impliqués dans cette propagation sont le rayonnement et la convection. Le feu et la façon dont il se propage sont influencés par des facteurs environnementaux, qu'ils soient d'origine humaine (prévention, lutte contre les incendies) ou naturelle. Les facteurs naturels sont généralement regroupés en trois catégories :

**-Météorologie** : les conditions météorologiques jouent un rôle important dans la propagation des incendies. La vitesse et la direction du vent, l'humidité de l'air, la température et la précipitation peuvent tous avoir un impact sur la vitesse et la direction de propagation du feu.

**-Topographie** : la forme du terrain peut affecter la vitesse et la direction de propagation des incendies. Les pentes abruptes, les vallées encaissées et les crêtes peuvent créer des conditions favorables à la propagation du feu en facilitant la montée des flammes ou en canalisant le vent.

**-Végétation** : le type, la densité et l'état de la végétation peuvent également influencer la propagation des incendies. Les forêts denses, les broussailles épaisses et les herbes sèches sont plus susceptibles de soutenir une propagation rapide des flammes. Ces facteurs naturels doivent être pris en compte lors de la planification de mesures de prévention et de lutte contre les incendies pour minimiser les risques et les dommages potentiels (Jappiot *et al.*, 2009).

## 5- Les statistiques des incendies forestiers

### 5-1- Dans le monde

Les statistiques mettent en évidence une préoccupation croissante concernant les incendies de forêt à travers le monde. Selon le World Resources Institute et l'université de Mayland, les feux de forêt ont été multipliés par deux au cours des 20 dernières années. Cette augmentation exponentielle est attribuée au changement climatique.

En se basant sur des informations satellitaires collectées par le Global Forest Watch, les incendies ravagent annuellement près de 3 millions d'hectares supplémentaires par rapport à l'an 2001, soit une surface comparable à celle de la Belgique. La dégradation de la couverture forestière causée par les incendies augmente d'environ 4% chaque année, soit une augmentation de 230 000 hectares. Environ la moitié de cette augmentation est attribuée aux incendies plus importants qui se produisent dans les forêts boréales, probablement en raison du réchauffement des températures dans les régions septentrionales, selon les chercheurs (GFW, 2023).

L'année 2021 a été l'une des pires années en termes d'incendies de forêt depuis le début du siècle. En effet, 9.3 millions d'hectares ont été détruits par les flammes, ce qui correspond à plus d'un tiers des pertes d'arbres de l'année. Il est préoccupant de constater que 70 % des surfaces brûlées au cours des 20 dernières années sont des forêts boréales. Ces forêts se trouvent principalement en Russie, au Canada et en Alaska, et jouent un rôle crucial en tant que puits de carbone. En Russie, près de 53 millions d'hectares ont été ravagés par les incendies depuis 2001, ce qui représente pratiquement la superficie de la France (GFW, 2023). Ces chiffres mettent en évidence l'importance de protéger ces forêts boréales, non seulement pour préserver la diversité biologique, mais aussi pour limiter les émissions de carbone. Les incendies de forêt dans ces régions exacerbent les problèmes liés au changement climatique en libérant d'importantes quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Ces chiffres soulignent l'urgence de prendre des mesures pour lutter contre les incendies de forêt et s'adapter aux conséquences du changement climatique. La préservation des forêts et la réduction des émissions de gaz à effet de serre sont essentielles pour atténuer cette augmentation alarmante des feux de forêt à l'échelle mondiale.

### 5-2- En Algérie

Le tableau 1 révèle les données sur les incendies en Algérie de l'année 2001 à 2023, mettant en corrélation la superficie totale brûlée en hectares avec le nombre d'incendies. Il est

remarquable que les premières années aient été relativement calmes jusqu'en 2004, où le nombre d'incendies a brusquement augmenté, passant de deux à onze, entraînant la destruction de 255,25 hectares de terres et de forêts. Cette tendance s'est poursuivie l'année suivante avec vingt incendies et plus de 330 hectares ravagés. Les années suivantes ont connu une fluctuation, avec un pic en 2012 enregistrant trente-sept incendies mais une superficie brûlée relativement faible, environ 151 hectares, contrairement à 2015 où malgré un nombre réduit d'incendies, la superficie brûlée est relativement importante. La superficie brûlée a atteint son maximum en 2019 et 2020 avec 564 et 480,5 hectares, respectivement. Depuis lors, elle a diminué jusqu'à aujourd'hui.

**Tableau 2.** Statistiques des incendies en Algérie de 2000 à 2023 (DGF, 2023).

| L'année | Surface totale brûlée<br>en hectares | Nombre d'incendies |
|---------|--------------------------------------|--------------------|
| 2001    | 22.95                                | 8                  |
| 2002    | 2                                    | 1                  |
| 2003    | 4.5                                  | 2                  |
| 2004    | 255.25                               | 11                 |
| 2005    | 330.5                                | 20                 |
| 2006    | 99                                   | 11                 |
| 2007    | 135                                  | 21                 |
| 2008    | 125.5                                | 9                  |
| 2009    | 144.5                                | 16                 |
| 2010    | 102.5                                | 12                 |
| 2011    | 121                                  | 11                 |
| 2012    | 151                                  | 37                 |
| 2013    | 17                                   | 8                  |
| 2014    | 98.5                                 | 16                 |
| 2015    | 207.75                               | 4                  |
| 2016    | 59.5                                 | 15                 |
| 2017    | 180                                  | 17                 |
| 2018    | 66.25                                | 16                 |
| 2019    | 564                                  | 16                 |
| 2020    | 480.5                                | 16                 |
| 2021    | 77                                   | 5                  |
| 2022    | 42.5                                 | 6                  |
| 2023    | 47.75                                | 6                  |

Ces données suggèrent une augmentation annuelle de la fréquence des incendies, mais il est difficile de généraliser que davantage d'incendies entraînent systématiquement une plus grande superficie brûlée en raison de la variabilité dans leur contrôle et leur fréquence irrégulière.

L'augmentation de la fréquence des incendies ces dernières années et leur impact sur l'environnement et l'économie nous obligent à repenser les causes et les conséquences, ainsi que la possibilité de trouver des solutions.

---

***Chapitre 2 : la composition  
microbiologique et  
physicochimique du sol***

---

### 1- Introduction

Le sol, un élément essentiel des écosystèmes terrestres, présente une particularité remarquable en tant que réservoir majeur de biodiversité sur la planète. Divers organismes tels que les bactéries, les champignons, les collemboles, les insectes et les myriapodes interagissent au sein de cet écosystème. Cette biodiversité variée est fondamentale pour le fonctionnement du sol et les nombreux services écosystémiques qu'il offre à l'humanité, tels que l'alimentation, l'espace de vie et le climat. Une meilleure caractérisation et compréhension du sol contribueront à une gestion plus efficace, préservant ainsi ce trésor pour les générations futures (Vincent *et al.*, 2023).

### 2 -Les micro-organismes du sol

Les êtres vivants présents dans le sol englobent les bactéries, les champignons, les algues, les protozoaires, les archées, ainsi qu'une diversité considérable de faune plus importante du sol. La microbiologie du sol, définie comme l'étude des micro-organismes présents, joue un rôle crucial dans le fonctionnement biologique des sols. Ces micro-organismes sont étroitement liés à diverses fonctions du sol.

#### 2-1-Les bactéries

Les bactéries sont, de loin, les microorganismes les plus abondants et diversifiés dans le sol. Elles se présentent sous une grande variété de formes et de tailles, principalement inférieures à 2 µm. On estime qu'un gramme de sol renferme environ un milliard de bactéries, appartenant à entre 2000 et 10000 espèces bactériennes (Roesch *et al.*, 2007).

Divers types de bactéries peuplent le sol, et la majorité reste encore inconnue. La plupart d'entre eux sont aérobies, nécessitant de l'oxygène atmosphérique. Cependant, certaines vivent sans oxygène, tandis que d'autres peuvent survivre dans des conditions avec ou sans oxygène. La croissance de ces bactéries est conditionnée par la disponibilité des nutriments dans le sol.

##### 2-1-1-Classification des bactéries du sol

La diversité taxonomique de la microflore bactérienne du sol est un domaine de recherche encore peu exploré, mais essentiel pour comprendre le rôle de ces micro-organismes dans les écosystèmes terrestres. La majorité des études se sont concentrées sur l'évaluation de l'abondance et de l'activité des groupes nutritionnels ou physiologiques.

Dans le manuel de Bergey, qui répertorie les espèces bactériennes, environ 1600 espèces ont été identifiées. Cependant, seulement 250 d'entre elles ont été isolées du sol. En tenant

compte des espèces présentes dans les vases ou associées aux débris végétaux dans le sol, on peut estimer que le sol abrite au moins 800 espèces bactériennes (Breed *et al.*, 1957). Il est important de noter que de nombreuses autres espèces bactériennes restent encore non répertoriées.

### **2-1-1-1- Classification phénotypique**

La classification des bactéries selon Dommergues et Mangenot en 1970 (Tableau 3 et 4) est une tentative de classer les bactéries en fonction de leurs caractéristiques morphologiques, physiologiques et écologiques. Cette classification a été élaborée avant l'avènement des techniques de biologie moléculaire avancées, et elle reposait principalement sur des critères observables au microscope et des données écologiques. Elle a été largement utilisée à l'époque pour organiser et nommer les différentes espèces de bactéries, mais elle a depuis été remplacée par des systèmes de classification plus modernes, tels que la classification basée sur la séquence génétique.

**Tableau 3.** Classification des Eubactériales sensu lato (Dommerglies et Mangenot, 1970)

| Groupe  | Familles   | Principaux caractères distinctifs   | Principaux genres vivant dans le sol   |
|---|--|---|--|
| <b>Pseudomonadales phototrophes (Bactéries photosynthétiques)</b> | <i>Thiorhodacées</i><br><i>Athiorhodacées</i><br><i>Chlorobactériacées</i> | Bâtonnets droits, phototrophes tirant leur énergie de la lumière solaire  | <i>Rhodospirillum</i><br><i>Rhodopseudomonas</i><br><i>Rhodomicrobium</i><br><i>Chlorobium</i>   |
|   | <i>Nitrobactériacées</i>   | Bâtonnets ; chimiolithotrophes tirant leur énergie de l'oxydation : de l'ammoniac en nitrite : bactéries nitrosantes, du nitrite en nitrate : bactéries nitrifiantes  | <i>Nitrosomonas</i><br><i>Nitrobacter</i>  |
| <b>Pseudomonadales chimiolithotrophes (Sauf exceptions)</b>       | <i>Thiobactériacées</i>  | Bâtonnets droits ; chimiolithotrophes tirant leur énergie de l'oxydation du soufre élémentaire ou des composés minéraux réduits du soufre   | <i>Thiobacillus</i>  |
|   | <i>Méthanomonadacées</i>   | Bâtonnets ; chimiolithotrophes tirant leur énergie de l'oxydation (de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone, du méthane)   | <i>Hydrogenomonas (a)</i><br><i>Carboxydomonas</i><br><i>Methanomonas (b)</i>  |
| <b>Pseudomonadales chimiolithotrophes (Sauf exceptions)</b>       | <i>Caulobactériacées</i><br><i>Sidérocapsacées</i>                         | Bactéries appartenant au groupe des <i>Ferrobactéries</i> et oxydant le fer ferreux en fer ferrique ; parfois chimiolithotrophes obligatoires, plus souvent chimiolithotrophes facultatifs et chimioorganotrophes   | <i>Caulobacter</i><br><i>Gallionella</i><br><i>Siderophacus</i><br><i>Siderocapsa</i><br><i>Siderosphaera</i><br><i>Ferribacterium</i> |
| <b>Pseudomonadales chimioorganotrophes</b>                        | <i>Pseudomonadacées</i>  | Bâtonnets droits ; aérobies et produisant souvent des pigments hydrosolubles, qui diffusent dans le milieu, ou non Hydrosolubles  | <i>Pseudomonas</i><br><i>Xanthomonas</i><br><i>Acetobacter</i><br><i>Azotomona</i>   |
|   | <i>Spirillacées</i>  | Aérobies (Bâtonnets courbes ou en hélice, formant souvent des chaînettes (Forme en virgule, bâtonnets courbes, longs et minces, cellulolytiques, bâtonnets courts, Cellulolytiques)   | <i>Vibrio</i><br><i>Ceuvibrio</i><br><i>Ceufalcicula</i>   |
|   | <i>Desulfovibrionaceae</i>   | Anaérobies (Bâtonnets courbes, anaérobies stricts, tirant leur énergie du couplage de l'oxydation (d'ailleurs incomplète) de certains substrats organiques et cil parfois d'hydrogène gazeux avec la réduction des sulfates en hydrogène sulfuré longues cellules Hélicoïdales) | <i>Desulfovibrio</i><br><i>Spirillum</i>   |

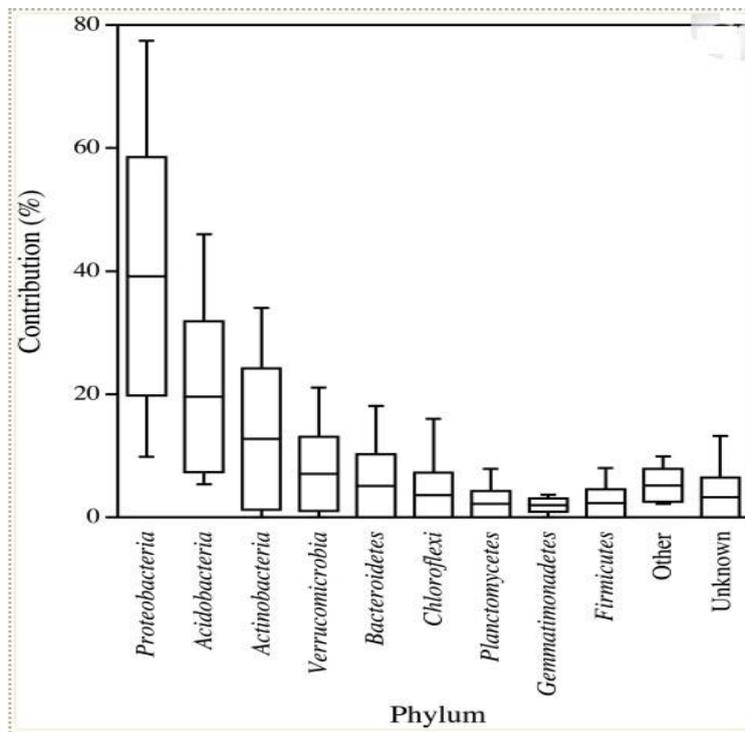
(a) On range souvent arbitrairement dans cette catégorie divers *Pseudomonas* oxydant facultativement l'hydrogène mais préférant, en général, se développer aux dépens de composés organiques. (b) Les Bactéries oxydant le méthane ne sont pas des chimiolithotrophes au sens strict car le méthane est un composé organique ; mais leur métabolisme rappelle celui des chimiolithotrophes. Les familles ou les genres qui sont inexistantes ou rares dans les sols Ils sont exclus.

**Tableau 4.** Classification des Eubactériales sensu stricto (Dommerglies et Mangenot ,1970)

| Familles                   | Principaux caractères distinctifs   | Principaux genres vivant dans le sol   |
|----------------------------|---|--|
| <i>Azotobactériacées</i>   | Gram négatif<br>Bactéries aérobies fixant l'azote moléculaire en présence de substrat carboné   | <i>Azotobacter</i><br><i>Beijerinckia</i><br><i>Derxia</i>                   |
| <i>Rhizobactériacées</i>   | Bâtonnets généralement Gram négatif<br>- symbiotiques (Légumineuses) aérobies<br>- saprophytes anaérobies facultatifs et produisant des pigments violets<br>- saprophytes ou parasites, anaérobies facultatifs, ne produisant pas de pigments   | <i>Rhizobium</i><br><i>Chromobacteriu//l</i><br><i>Agrobacterium</i>         |
| <i>Achromobactériacées</i> | Bâtonnets Gram négatif, à faible pouvoir fermentaire vis-à-vis des hydrates de carbone<br>- ne produisant pas de pigment<br>- produisant des pigments jaunes ou orange  | <i>Achromobacter</i><br><i>Flavobacterium</i>                                |
| <i>Entérobactériacées</i>  | Bâtonnets Gram négatif, aérobies ou anaérobies facultatifs, fermentant activement les hydrates de carbone   | <i>Escherichia</i><br><i>Proteus</i><br><i>Aerobacter</i><br><i>Serratia</i> |
| <i>Micrococcacées</i>      | Cocci sphériques Gram positif<br>- cellules en paquets irréguliers ou en tétrades produisant quelquefois des pigments jaunes, orange ou rouges<br>- cellules en paquets cubiques (division dans trois plans perpendiculaires)   | <i>Mierococcus</i><br><i>Sarcina</i>   |
| <i>Brevibactériacées</i>   | Bâtonnets Gram positif, quelquefois morphologie coccoïde ou filamenteuse.<br>Souvent pigmentés, aérobies ou anaérobies facultatifs  | <i>Brevibacterium</i>  |
| <i>Lactobacilliacées</i>   | Gram positif, effectuant une fermentation lactique des sucres ; microaérophiles à anaérobies<br>- cocci en chaînettes (division dans un seul plan)<br>- bâtonnets droits et minces  | <i>Streptococcus</i><br><i>Leuconostoc</i><br><i>Lactobacillus</i>           |
| <i>Corynébactériacées</i>  | Bâtonnets Gram positif à morphologie irrégulière ; cellules souvent disposées en rangées parallèles ou apposées en raison d'un type de division particulier, surtout aérobies, pouvoir fermentaire souvent médiocre, présentant une certaine parenté avec les <i>Mycobactériacées</i>   | <i>Corynebacterium</i><br><i>Cellulomonas</i><br><i>Arthrobacter</i>         |
| <i>Bacillacées</i>         | Principale famille formant des endospores ; gros bâtonnets droits Gram positif ; souvent mobiles<br>- aérobies, spores ovales dont le diamètre est inférieur à celui de la cellule végétative ( <i>B. megaterium</i> , <i>B. cereus</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i> ) ou supérieur ( <i>B. macerans</i> , <i>B. polymyxa</i> ) ou spores sphériques ( <i>B. pasteurii</i> )<br>- anaérobies stricts, cellules en général déformées par la spore qui peut être terminale ou subterminale, sphérique ou ovale, de nombreuses espèces fixent l'azote atmosphérique. | <i>Bacillus</i><br><i>Clostridium</i>  |

### 2-1-1-2- Classification phylogénétique

Les gènes ARNr 16S des bactéries du sol sont affiliés à au moins 32 groupes de phylum. Les contributions des membres de différents phylums aux différentes communautés bactériennes du sol varient (Figure 1). Les phylums dominants dans les bibliothèques sont les *Proteobacteria*, les *Acidobacteria*, les *Actinobacteria*, les *Verrucomicrobia*, les *Bacteroidetes*, les *Chloroflexi*, les *Planctomycetes*, les *Gemmatimonadetes* et les *Firmicutes* (Janssen, 2006). Les membres de ces neuf phylums représentent en moyenne 92% des bibliothèques de sol. Bien qu'il existe au moins 52 phylums bactériens, dont 24 sont reconnus par le Manuel de Bergey, les sols semblent être dominés par seulement un petit nombre d'entre eux. (Janssen, 2006). La distribution des genres bactériens dans les différents types de sols inclue une prédominance des *Pseudomonas*, des *Bacillus* sporulants, et des *Arthrobacter*. D'autres genres notables sont *Clostridium*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Xanthomonas*, *Chromobacterium*, et *Sarcina*. Les micro-organismes impliqués dans la fixation de l'azote comme *Rhizobium*, *Clostridium*, *Azotobacter*, *Azotomonas*, *Nitrosomonas*, et *Nitrobacter*, bien que représentant une fraction limitée des populations bactériennes, jouent un rôle crucial (Nola *et al.*, 2001).



**Figure 1.** Contributions des ARNr 16S et des gènes ARNr 16S de divers phylums dans les bibliothèques issues des communautés bactériennes du sol (2 920 clones dans 21 bibliothèques) (Janssen, 2006). La ligne horizontale au milieu de chaque bloc indique la moyenne, le bloc représente 1 écart type de chaque côté de la moyenne, et les lignes verticales s'étendant au-dessus et en dessous de chaque bloc indiquent les contributions minimales et maximales de chaque phylum.

Les arbres phylogénétiques offrent une structure permettant de saisir l'évolution de la diversité biologique (Pisani *et al.*, 2015). Un aperçu général des principaux groupes de bactéries du sol classé selon leur position phylogénétique :

### A- Le phylum des *Proteobacteria*

Ce vaste phylum de bactéries Gram négatif englobe une diversité impressionnante de genres, parmi lesquels on trouve des pathogènes notables tels que *Escherichia*, *Salmonella*, *Vibrio*, *Helicobacter*, *Yersinia*, *Legionellales*, et bien d'autres. D'autres membres de ce phylum sont libres, non parasitaires, et incluent de nombreuses bactéries qui jouent un rôle crucial dans la fixation de l'azote (Madigan et Martinko, 2005).

Parmi les classes de *Proteobacteria* dont les noms ont été validement publiés, on trouve plusieurs genres notables, notamment (Letunic et Bork 2024) :

- *Alphaproteobacteria* : Leurs membres sont très divers ex : *Agrobacterium*, *Rhizobium*
- *Betaproteobacteria* : (*Burkholderia*, *Neisseria*).
- *Gammaproteobacteria* : *Escherichia*, *Salmonella*
- *Deltaproteobacteria* : *Bdellovibrio*, *Myxococcus*
- *Epsilonproteobacteria* : *Helicobacter*, *Campylobacter*

### B- Le phylum des *Actinobacteria*

Le phylum *Actinobacteria*, classé comme l'une des plus grandes unités taxonomiques parmi les grandes lignées de bactéries (Ludwig *et al.*, 2012), se compose principalement d'organismes libres, répartis largement dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, y compris les milieux marins (Macagnan *et al.*, 2006). Ces bactéries filamenteuses Gram-positives possèdent des génomes riches en guanine-plus-cytosine (G+C). Leur croissance est caractérisée par une extension et une ramification des hyphes. Traditionnellement considérés comme des formes transitionnelles entre les champignons et les bactéries, les actinomycètes produisent un mycélium et se reproduisent par sporulation (Lechevalier et Lechevalier, 1965). Cependant, cette comparaison est superficielle, car les actinomycètes ont des caractéristiques propres aux bactéries, telles qu'une structure cellulaire mince avec un chromosome organisé dans un nucléoïde procaryotique et une paroi cellulaire de peptidoglycane, les rendant sensibles aux agents antibactériens. Sur le plan physiologique et écologique, la plupart des *Actinobacteria* sont aérobies, bien que des exceptions existent (Zimmerman *et al.*, 1980).

Ils sont capables d'utiliser une grande variété de sources nutritionnelles et peuvent être des habitants du sol ou des environnements aquatiques (par exemple, les espèces *Streptomyces*, *Rhodococcus* et *Salinispora*), des symbiotes de plantes (par exemple, les espèces *Frankia*), ou des pathogènes végétaux ou animaux (par exemple, les espèces *Corynebacterium*, *Mycobacterium* ou *Nocardia*) (Essaid *et al.*, 2015).

### C- Le phylum des *Firmicutes*

Ce phylum abrite des bactéries Gram positives qui forme des endospores, la plupart ayant un faible taux de GC dans leur ADN (< 50 %). Elles peuvent être aérobies ou anaérobies, avec certaines espèces étant phototrophes. Les classes *Bacilli* (composées de 2 ordres et 15 familles) et *Clostridia* (composées de 4 ordres et 18 familles) sont les plus significatives au sein de ce groupe. On y trouve plusieurs genres et espèces notables, dont *Bacillus* (représenté par *B. subtilis*, une bactérie modèle du sol) et *Clostridium* (Galperin, 2013).

### D- Le phylum des *Acidobacteria*

Le phylum *Acidobacteria* est parmi les plus répandus et abondants sur la planète, mais notre compréhension de leur rôle dans les écosystèmes terrestres reste rudimentaire. Les difficultés liées à leur culture classique contribuent à ce manque de connaissance. Les données génomiques et métagénomiques suggèrent que certaines acidobactéries ont des capacités écologiques importantes, telles que l'utilisation du nitrite comme source d'azote, la réponse aux nutriments et à l'acidité du sol, ainsi que la production de substances comme les exopolysaccharides et la dégradation de la gomme de gellan. Bien que ces prédictions indiquent un mode de vie compétitif dans le sol, elles nécessitent encore des études physiologiques pour confirmation (Anna *et al.*, 2016).

### E- Le phylum des *Chloroflexi*

Il contient des bactéries Gram négatif qui sont photosynthétiques sans oxygène, avec certains membres étant aérobies. L'ordre des Chloroflexales, notamment la classe *Anaerolinea*, est principalement composé de bactéries photosynthétiques contenant de la bactériochlorophylle a ou c, ainsi que des caroténoïdes (Campbell *et al.*, 2014).

### F- Le phylum des *Bacteroidetes*

Ce groupe comprend des bactéries à Gram négatif qui sont souvent présentes dans les sols riches en matière organique. Ils sont impliqués dans la décomposition de la matière organique et peuvent jouer un rôle important dans le cycle des éléments nutritifs. Des exemples incluent

les genres *Sphingobacterium* et *Flavobacterium*, qui sont connus pour leur capacité à dégrader les xénobiotiques et les polluants organiques, selon une synthèse bibliographique (Mandy, 2010).

Cette classification offre un aperçu général de la diversité phylogénétique des bactéries du sol, mais il convient de noter qu'il existe de nombreux autres phylums de bactéries présents dans le sol, et que la diversité réelle peut varier considérablement en fonction des conditions du sol et de l'environnement.

### 2-2-Les champignons

Au début du XXe siècle, certains auteurs remettaient en question l'existence même d'une flore fongique spécifique au sol. Ils soutenaient que le développement de mycéliums sur les plaques de gélose nutritiveensemencées par des suspensions de terre ne prouvait que la présence de spores dormantes apportées au sol par des débris végétaux ou provenant de contaminations atmosphériques. L'existence d'une microflore tellurique dans le sol est désormais largement acceptée. Cependant, sa composition exacte, son activité et sa biomasse restent encore partiellement comprises. Des études récentes utilisant des méthodes d'extraction et d'analyse de l'ADN du sol ont permis d'obtenir une vue plus précise de cette microflore cachée. On estime maintenant qu'il existe environ 10 000 génotypes microbiens différents par gramme de terre. Depuis plusieurs décennies, des recherches ont montré l'importance de la microflore tellurique pour la croissance et la santé des plantes (Lemanceau *et al.*, 2011). Cette microflore peut contenir des populations phytopathogènes responsables de maladies d'origine tellurique, mais aussi des populations bénéfiques qui stimulent les réactions de défense des plantes. Face au changement climatique, il est crucial de comprendre son impact sur le microbiote du sol et les services écosystémiques qu'il fournit pour maintenir une agriculture durable et nourrir les populations à l'avenir (Naylor et Coleman-Derr, 2017 ; Jansson et Hofmockel, 2020).

La vaste diversité des champignons a conduit à leur classification en plusieurs groupes taxonomiques (Tedersoo *et al.*, 2014), tels que *Chytridiomycètes*, *Glomeromycètes*, *Basidiomycètes*, *Ascomycètes*, *Mucoromycètes* (anciennement zygomycètes). Ces trois groupes représentent ensemble près de 97 % de la communauté fongique du sol, avec des pourcentages respectifs de 56 %, 31 % et 10 %. Pour des raisons pratiques, les champignons peuvent également être classés selon leur mode d'alimentation dans le sol : saprophytes, mycorhiziens, endophytes et pathogènes (Toju *et al.*, 2016).

### 2-2-1-Les champignons saprophytes

Les champignons saprophytes se nourrissent de matières organiques mortes (MOM) déjà plus ou moins décomposées ou dégradées par d'autres organismes. Ces MOM leur fournissent les éléments nutritifs prédigérés grâce à l'excrétion d'enzymes extracellulaires fongiques. Les saprophytes représentent environ 44 % de la communauté fongique, avec une faible variation entre les différents types d'écosystèmes (Tedersoo *et al.*, 2014).

Une classification plus fonctionnelle a également été développée pour les champignons saprophytes, les regroupant en pourritures blanches, brunes et molles (Schwarze *et al.*, 2000). Ces classifications visuelles de la dégradation de la lignine sont liées à la décomposition des litières des plantes, variant selon les espèces. Il est important de noter que ces appellations reflètent en réalité leur capacité à dégrader la cellulose et l'hémicellulose, constituants majeurs des plantes et de leur litière (Vincent *et al.*, 2023).

### 2-2-2-Les champignons mycorhiziens

Les champignons mycorhiziens se divisent en deux grands groupes : les ectomycorhiziens et les endomycorhiziens.

Les champignons ectomycorhiziens forment un réseau d'hyphes (réseau de Hartig) à la surface des racines des plantes, créant un manteau périphérique qui facilite les échanges entre la plante et le champignon. Ces champignons sont principalement associés à des hôtes végétaux arbustifs et arborés, avec plus de 95 % appartenant au groupe des *Basidiomycètes* (Narayanasamy, 2011).

D'autre part, les champignons endomycorhiziens établissent des structures intracellulaires, avec des hyphes pénétrant à l'intérieur des cellules racinaires pour des échanges étroits avec la plante. Les champignons mycorhiziens à arbuscules (MA) forment des arbuscules dans les cellules du cortex racinaire, permettant des échanges directs entre la racine et le champignon. De plus, des hyphes extra radiculaires se développent à l'extérieur de la racine, explorant le sol et apportant des spores (Fortin *et al.*, 2016). Les champignons (MA), exclusivement des Glomeromycètes, sont des symbiotrophes obligatoires, nécessitant l'interaction avec la plante hôte pour obtenir des éléments carbonés et compléter leur cycle de développement. Cette association bénéficie à la plante en améliorant sa nutrition hydrique et minérale, notamment en phosphore fourni par le champignon, souvent entraînant une augmentation de la biomasse végétale par rapport à une plante non colonisée (Vincent *et al.*, 2023).

### 2-2-3-Les champignons endophytes

Les champignons endophytes, également appelés champignons racinaires, colonisent les structures internes des plantes de manière asymptomatique, prélevant des nutriments de l'hôte sans provoquer de signes de maladie. Contrairement aux champignons mycorhiziens qui se développent dans la rhizosphère tout en colonisant les plantes, les champignons endophytes restent entièrement dans les tissus racinaires. Ces champignons, principalement issus des Ascomycètes et Basidiomycètes, comprennent les Dark Septate Endophytes (DSE), les *Sebacinales* et les *Trichoderma*, parmi les trois membres les plus connus (Chadha *et al.*, 2014). Tout comme les champignons mycorhiziens, les champignons endophytes favorisent la croissance et renforcent la résistance aux stress abiotiques de la plante hôte (Vincent *et al.*, 2023).

### 2-2-4-Les champignons pathogènes/parasites

Les champignons pathogènes, qu'ils soient parasites d'autres champignons, pathogènes pour les animaux ou phytopathogènes pour les plantes (phytopathogènes) (Nguyen *et al.*, 2016), ont la capacité d'infecter les racines. Certains peuvent également pénétrer les systèmes vasculaires des plantes, colonisant l'ensemble de l'organisme en remontant les vaisseaux de xylème. Bien que leur principale cible soit les parties aériennes des plantes, ces phytopathogènes du sol peuvent initier une infection à partir des racines (Vincent *et al.*, 2023).

### 2-3-La microfaune

La microfaune, invisible à l'œil nu, est composée d'individus généralement plus petits que 200 µm, leur permettant de vivre dans la porosité capillaire du sol. Les rotifères et les tardigrades font partie de cette microfaune, mais ce sont surtout les protozoaires et les nématodes qui en constituent l'essentiel.

Les protozoaires, présents en abondance de 100 à 1000 millions d'individus au mètre carré, se distinguent par leur diversité nutritionnelle, avec la capacité d'ingérer des particules et de se nourrir de bactéries. Ils cohabitent avec les nématodes dans le film d'eau entourant les particules de sol (Orgiazzi *et al.*, 2016).

Les nématodes jouent un rôle crucial dans la minéralisation, la décomposition des matières organiques, et la régulation des communautés microbiennes (Vincent *et al.*, 2023). Environ 30 000 espèces de nématodes sont connues, représentant seulement environ 5 % du nombre d'espèces existantes. Classifiés en cinq groupes trophiques, incluant les bactérivores,

les fongivores, les omnivores, les phytoparasites et les prédateurs (se nourrissent d'autres animaux) (Orgiazzi *et al.*, 2016).

Dans l'ensemble, la faune du sol agit en tant que vecteur de dispersion et d'activation de la microflore dans le sol, jouant également un rôle significatif dans la rhizosphère (Lavelle *et al.*, 1995).

### 3-Rôle des microorganismes dans le sol

Fondamentalement, c'est à travers leurs rôles de minéralisation, englobant la décomposition de la matière organique, l'oxydo-réduction de composés inorganiques, la solubilisation ou précipitation de minéraux, ainsi que la transformation de composés organiques plus ou moins résistants, que les bactéries jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des sols (Gobat *et al.*, 2010). Leur contribution est essentielle pour réguler les cycles biogéochimiques fondamentaux des sols, notamment ceux du carbone, de l'azote, du phosphore et du soufre. Elles accomplissent cette fonction en manifestant diverses capacités, telles que la réduction des sulfates en sulfites et sulfures, connues sous le nom de bactéries sulfato-réductrices, ou encore l'oxydation du soufre avec des organismes comme *Thiobacillus*. De plus, elles sont capables de produire des nitrates grâce à des bactéries nitrifiantes telles que *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* qui convertissent l'ammoniac en nitrites, puis en nitrates, qui peuvent être absorbés par les plantes. Elles contribuent également à la disponibilité du phosphore, notamment par le biais de la phosphatase alcaline, parmi d'autres mécanismes.

Par ailleurs, d'autres bactéries sont capables de fixer l'azote atmosphérique, soit de manière autonome, soit en symbiose avec les plantes. Certaines bactéries, notamment celles appelées PGPR (Plant Growth Promoting *Rhizobacteria*, des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes), ont la capacité de former des associations symbiotiques avec les racines des plantes, ce qui leur permet d'améliorer l'absorption des nutriments et d'accroître la résistance des plantes aux stress biotiques et abiotiques. En conséquence, les PGPR sont souvent utilisées comme agents de biocontrôle ou comme biofertilisants dans l'agriculture durable pour réduire l'utilisation de produits chimiques tout en augmentant les rendements des cultures (Srivastava et Sharma 2014 ; Vandana *et al.*, 2020 ; Mohanty *et al.*, 2021)

Ces diverses activités bactériennes constituent ainsi la fondation sur laquelle repose la régulation des cycles biogéochimiques clés des sols.

Les bactéries jouent également un rôle dans la dépollution des sols contaminés par des métaux lourds (éléments traces métalliques ou ETM), modifiant leur disponibilité. Elles interviennent particulièrement dans la dépollution des composés organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en les minéralisant au moins partiellement (Ahemad, 2014).

Les biofilms formés par les bactéries dans le sol représentent une biomasse microbienne significative qui immobilise d'importantes quantités de nutriments. Divers processus, tels que la prédation par les protozoaires, les nématodes ou les micro-arthropodes, peuvent conduire à la libération prolongée ou rapide de ces nutriments immobilisés et en excès (Bardgett *et al.*, 2010). Cette remobilisation de nutriments est communément appelée la « boucle microbienne », considérée comme un point de contrôle primaire de la disponibilité des nutriments au sein de la rhizosphère (Vincent *et al.*, 2023).

### **4-La composition physico-chimique du sol forestier**

La composition physico-chimique du sol forestier peut varier en fonction de nombreux facteurs, notamment le type de forêt, le climat, le relief, le temps écoulé depuis la dernière perturbation, et les types de plantes et d'organismes qui y poussent. Cependant, voici quelques caractéristiques générales de la composition physico-chimique du sol forestier :

#### **4-1-La porosité**

Les sols variés se distinguent par leur porosité, ce qui influe considérablement sur l'activité microbienne. Les pores du sol servent d'habitats aux microorganismes, cependant, ces habitats peuvent varier en termes d'avantages ou de contraintes selon leur nature. Les pores du sol peuvent notamment varier selon plusieurs aspects.

La texture et la structure du sol influent sur la taille, la forme et la distribution des pores, ainsi que sur leur accessibilité et la disponibilité en eau et en oxygène. De plus, la teneur en matière organique, certains composés chimiques, et le pH du sol jouent un rôle crucial dans la disponibilité d'énergie et d'éléments minéraux pour les organismes décomposeurs. Ces facteurs affectent également l'accessibilité des microorganismes, des enzymes et des organismes microbivores, régulant ainsi la composition et l'activité des communautés microbiennes. Par ailleurs, la connexion des pores du sol à la surface et à l'atmosphère détermine le niveau d'oxygène nécessaire pour les processus métaboliques aérobies, tandis que le remplissage en eau des pores influence leur propice à l'activité microbienne (Baize *et al.*, 2013).

## **4-2- La texture**

Les particules constituant le sol sont généralement en mélange, bien qu'ils soient définis selon la texture dominante.

### **4-2-1-Textures sableuses**

Elles sont caractérisées par leur aspect meuble, aéré et filtrant. Les sols sableux ont une capacité de rétention en eau faible, surtout s'ils sont principalement composés de silice. Ils sont souvent pauvres en éléments minéraux. Les sables donnent une sensation de grattage et crissent lorsqu'on les manipule. S'ils contiennent une proportion minoritaire d'argiles ou de limons, ils peuvent laisser un voile poudreux sur les doigts et avoir un toucher plus souple.

### **4-2-2-Textures limoneuses**

Elles sont souvent riches en éléments minéraux et ont une capacité de rétention en eau importante. Cependant, ces sols sont sensibles au tassement. Les limons, lorsqu'ils sont humides, s'étalent sur les doigts et laissent apparaître de petites écailles après une pression. Ils ont un toucher doux et soyeux. À l'état sec, ils peuvent tacher et dessécher les doigts. Lorsque la proportion d'argile atteint un certain seuil (environ 20 %), la texture devient limono-argileuse, présentant une certaine adhésivité lorsqu'elle est humide.

### **4-2-3-Textures argileuses**

Formée grâce à l'association des particules d'argile et de matière organique, favorisent la formation du complexe absorbant du sol, qui agit comme un véritable fixateur d'éléments minéraux et d'eau. Leur capacité de rétention en eau est élevée. Cependant, une proportion excessive d'argile dans le sol peut le rendre asphyxiant et compact. Les sols argileux se distinguent par leur aspect fin, leur toucher lisse, leur plasticité (capacité à se déformer sous pression) et leur adhésivité lorsqu'ils sont humides ou frais. À l'état sec, ils présentent une certaine ténacité (résistance à la pression) (CNRF).

## **4-3-Réactions d'échange**

Il existe deux types de réactions d'échange dans le sol :

### **4-3-1-Échanges de cations**

Il s'agit d'une réaction dans laquelle des ions positifs (cations) sont échangés entre les particules du sol et la solution du sol. Les particules du sol, telles que l'argile et l'humus, ont des charges négatives et peuvent adsorber et retenir des cations tels que le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), le potassium ( $\text{K}^+$ ), et les ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Ces cations peuvent

Être échangés avec d'autres cations présents dans la solution du sol, en fonction de leur affinité pour les sites d'échange du sol.

Les ions  $H^+$  tiennent aussi une place particulière : lorsque les cations métalliques sont insuffisamment abondants, les charges négatives sont compensées par des ions  $H^+$ , ce qui confère au sol un caractère acide. Les meilleures conditions agronomiques correspondent au voisinage de la neutralité, et on remédie à une proportion excessive d'ions  $H^+$  (ou  $Al^{3+}$  se substituant aux  $H^+$ ) par le chaulage, c'est-à-dire par des apports de chaux ou de calcaire finement broyé (Blanchet, 2023).

La Capacité d'Échange Cationique (CEC) représente la capacité du sol à retenir et à échanger des ions positifs (cations) avec la solution du sol. Plus la CEC d'un sol est élevée, plus il peut retenir de cations et donc fournir des éléments nutritifs essentiels aux plantes. La CEC des sols forestiers peut varier en fonction de la composition minérale et organique du sol. Une CEC élevée est généralement associée à une fertilité du sol accrue et à une meilleure rétention des nutriments (Khaledian *et al.*, 2017).

### 4-3-2-Échanges d'anions

Les colloïdes du sol possèdent un caractère amphotère, ce qui se manifeste notamment en milieu acide par leur capacité à adsorber et à échanger des anions. Cependant, ces réactions sont généralement plus restreintes que les échanges de cations (Blanchet, 2023).

### 4-4-Le pH du sol

Le pH du sol forestier est un aspect chimique crucial, déterminant son acidité ou son alcalinité (basicité). Un sol fertile, propice au développement optimal de la vie microbienne et à l'assimilation efficace des éléments par les plantes, affiche un pH compris entre 6 et 7.

Le pH, ou potentiel Hydrogène, est une mesure de l'acidité ou de la basicité du sol, évaluée sur une échelle de 1 à 14, où 1 représente le plus acide, 7 la neutralité et 14 le plus basique. Pour le sol et les plantes qui y poussent, le pH est d'une importance primordiale car il influence l'absorption des nutriments par les racines.

Un sol très acide, avec un pH inférieur à 5, peut entraîner des carences en calcium et en phosphore, sauf pour les plantes acidophiles qui s'adaptent à ce milieu. Un sol très basique, avec un pH supérieur à 8, peut compromettre l'assimilation du magnésium et du fer par les plantes (Blanchet, 2023).

---

***Chapitre 3 : L'impact des feux  
de forêt sur la stabilité  
fonctionnelle des facteurs  
écologiques***

---

### 1- L'impact des incendies sur les facteurs biotiques

#### 1-1- L'impact sur la microflore du sol

Les micro-organismes jouent un rôle crucial dans la fertilité du sol. Ce sont les principaux agents de décomposition de la matière organique (Vance et Chapin, 2001). La quantité de bactéries et de champignons (biomasse et/ou densité) influence la dynamique des cycles biogéochimiques (Thirukkumaran et Parkinson, 2000).

Le feu affecte principalement les horizons superficiels du sol (de 0 à 10 cm de profondeur). Cet horizon est également celui qui abrite une densité élevée de micro-organismes et une activité microbienne intense (Neary *et al.*, 1999). Les incendies ont des impacts directs et indirects sur les micro-organismes du sol. Les impacts directs, généralement à court terme, modifient la composition et la densité des communautés microbiennes du sol sous l'effet des températures élevées. Après un seul incendie, certaines études ont montré une diminution significative de la biomasse, des activités de minéralisation et de la diversité des communautés microbiennes dans les sols brûlés (Hart *et al.*, 2005). Une étude réalisée dans la forêt de Fénouane, située dans les piémonts méridionaux de l'Atlas tellien Algérien a indiqué une résilience complète de la biomasse microbienne deux ans après un incendie (Borsali, *et al.*, 2012). Des études antérieures ont montré des variations dans la récupération de la biomasse microbienne après les incendies. Par exemple, une étude menée dans le Colorado a montré un retour à la biomasse microbienne initiale après 14 mois (Hamman *et al.*, 2007), tandis qu'en région méditerranéenne, une réduction persistante a été observée plus de 11 ans après un incendie (Dumontet *et al.*, 1996).

Fierer et Schimel (2002) suggèrent que l'augmentation de la résilience après une histoire de stress importante peut être expliquée par trois hypothèses : la taille de la communauté, le niveau des ressources et la sélection.

L'augmentation de la température provoquée par le feu entraîne une réduction de la biomasse microbienne pouvant aller jusqu'à la quasi-stérilisation des couches superficielles (Pietro-Fernandez *et al.*, 1998). La résilience de la biomasse microbienne est influencée par plusieurs facteurs. Parmi eux, l'humidité des sols apparaît comme le principal déterminant de l'effet du feu sur les propriétés biologiques des sols. En effet, la biomasse microbienne diminue proportionnellement au taux d'humidité des sols après un incendie, vraisemblablement en raison de la meilleure conductivité de l'eau par rapport à l'air, ce qui accélère la propagation de la chaleur. (Choromanska et DeLuca, 2002 ; Borsali, *et al.*, 2012). Les autres paramètres, comme

les niveaux de certains composés chimiques dans le sol, ont également un effet, mais moins significatif (Borsali, *et al.*, 2012).

Bien que le sol ait la capacité de se rétablir avec le temps, le rétablissement complet des activités enzymatiques peut prendre des années, voire des décennies. Ces changements peuvent avoir des implications importantes pour la santé et la productivité des écosystèmes forestiers à long terme. Les résultats de Borsali et ses collaborateurs (2012) montrent une résilience totale de la biomasse microbienne du sol après deux ans d'incendie. Toutefois, ils démontrent que les activités enzymatiques du sol sont sensiblement affectées par les incendies et leur rétablissement varie selon le type d'enzyme. Les FDA hydrolases (estérases, protéases, lipases, cutinases), par exemple, récupèrent rapidement leur niveau normal après quatre ans, tandis que les phosphomonoestérases alcalines connaissent une augmentation significative entre deux et quatre ans après l'incendie. Les uréases montrent une diminution persistante pendant au moins 13 ans, et les phénol-oxydases connaissent une augmentation temporaire suivie d'une diminution progressive (Borsali, *et al.*, 2012). Ces résultats mettent en lumière l'importance de prendre en compte les effets à long terme des incendies sur les activités enzymatiques du sol, ce qui peut avoir des implications importantes pour la santé et la productivité des écosystèmes forestiers.

L'activité des microorganismes impliqués dans la minéralisation est perturbée, ce qui entraîne des modifications dans l'équilibre entre les différents groupes fonctionnels microbiens et la qualité de la matière organique. De plus, une augmentation du niveau d'ions ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) peut stimuler la croissance des bactéries nitrifiantes (Hart *et al.*, 2005).

Le feu altère la ressource organique et modifie les propriétés des sols, ce qui influence la survie et la réinstallation des organismes du sol de manière indirecte. De plus, il génère des composés nocifs tels que des molécules aromatiques polychlorées et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), perturbant ainsi le fonctionnement microbien et ralentissant les cycles de la matière. En outre, il diminue la diversité fonctionnelle microbienne (D'Ascoli *et al.*, 2005 ; Overby *et al.*, 2006).

#### **1-2-L'impact sur la végétation forestière**

Les incendies de forêt représentent une menace pour les humains, leurs infrastructures et l'environnement. Ils posent un danger écologique en tuant de nombreux animaux pris au piège des flammes, notamment à travers les clôtures. De plus, ces incendies détruisent les habitats de la faune et de la flore, perturbant ainsi leur population et leur cycle de vie. Les flammes altèrent

également les conditions environnementales, favorisant la propagation de nouvelles espèces invasives qui n'étaient pas présentes avant l'incendie. En conséquence, ces espèces ont davantage de chances de s'établir et de se développer dans l'écosystème après le feu. La déforestation entraîne également un ruissellement accru des eaux de surface, ce qui augmente l'érosion du sol et crée une instabilité dangereuse tant pour les humains que pour la faune (Estelle, 2021).

Néanmoins, plusieurs études ont souligné la capacité des feux de forêt à favoriser la biodiversité. En effet, un incendie crée une végétation diversifiée composée de nombreuses espèces pionnières qui ont une forte capacité à coloniser un environnement dégradé. Une végétation diversifiée abrite ainsi une plus grande variété d'espèces. On estime que de 20 à 35 espèces végétales supplémentaires sont présentes dans les zones ayant connu des feux de forêt par rapport à celles n'ayant jamais été touchées par le feu. De plus, les mouches et les coléoptères prospèrent également grâce aux feux de forêt, car les arbres affaiblis fournissent un habitat et des conditions de reproduction propices. Leur présence attire ainsi de nombreux oiseaux sur les sites brûlés. Cependant, il est important de noter que les feux de forêt émettent une quantité significative de gaz à effet de serre, notamment du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), du méthane et de l'oxyde d'azote, contribuant ainsi activement au changement climatique (Estelle, 2021).

Selon l'Oreé (Entreprises, territoires et environnement), les incendies sont une composante naturelle importante dans la régénération de certains écosystèmes. Ils favorisent le renouvellement de certaines espèces végétales et maintiennent une diversité de milieux ouverts, semi-ouverts et fermés propices à la biodiversité. Cependant, lorsque les incendies deviennent trop fréquents ou couvrent de vastes superficies, ils conduisent à une uniformisation de l'environnement et représentent une menace sérieuse pour les espèces rares ou localisées. De plus, les incendies peuvent éliminer les graines d'espèces végétales présentes dans la litière, réduire la quantité de matière organique et initier le processus d'érosion des sols. Le feu est un élément essentiel et naturel dans le fonctionnement de nombreux écosystèmes forestiers. Pendant des millénaires, les êtres humains ont utilisé le feu comme un outil de gestion des terres, ce qui a façonné les communautés végétales au fil des siècles. En tant que processus naturel, le feu joue un rôle crucial dans le maintien de la santé de certains écosystèmes (Dennis *et al.*, 2001). Cependant, depuis la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, en raison de changements survenus, les incendies de forêt ont commencé à avoir des impacts significatifs (FAO, 2001).

Les incendies de forêt affectent la biodiversité de plusieurs manières. À l'échelle mondiale, ils constituent une importante source d'émissions de carbone, contribuant ainsi au réchauffement de la planète, ce qui pourrait entraîner des changements dans la biodiversité. Au niveau régional et local, les incendies modifient le volume de la biomasse, perturbent le cycle hydrologique avec des répercussions sur les écosystèmes marins tels que les récifs coralliens, et influent sur le cycle de vie des plantes et des animaux. De plus, la fumée dégagée par les feux de forêt peut significativement réduire l'activité photosynthétique (Davies et Unam, 1999) et compromettre souvent la santé des êtres humains et des animaux (Dennis *et al.*, 2001).

Une des conséquences écologiques les plus graves des incendies est la probabilité accrue de nouveaux départs de feu dans les années qui suivent. En effet, les arbres morts tombent, créant des trouées dans la forêt où le soleil pénètre et dessèche la végétation. Ces zones deviennent des sites d'accumulation de combustibles, favorisant la prolifération d'espèces vulnérables au feu, comme les graminées pyrophytes. Les incendies répétés sont particulièrement destructeurs car ils contribuent à l'appauvrissement de la diversité biologique des écosystèmes de forêt ombrophile (Dennis *et al.*, 2001).

## **2- L'impact des incendies sur les facteurs abiotiques**

### **2-1- L'impact sur la matière organique**

La littérature scientifique présente une diversité de résultats contradictoires sur l'impact des feux de forêt sur la matière organique des sols (MOS), certains cas montrant des pertes tandis que d'autres montrent des gains. Cette variation résulte de facteurs tels que l'intensité du feu, la température atteinte, la durée de passage du feu, les conditions climatiques, le type et la quantité de combustible, ainsi que l'état du sol. Les horizons supérieurs du sol, étant les plus riches en matière organique, sont les premiers à subir l'impact des feux, en particulier avec une intensité élevée (Rubio *et al.*, 2004). La majorité des études portant sur les émissions de carbone et d'autres produits chimiques provenant des feux de forêt se sont concentrées sur les feux de canopée ou les défrichements qui détruisent une grande quantité de biomasse. Toutefois, dans de nombreux écosystèmes méditerranéens, les feux de surface, de diverses intensités, peuvent également entraîner des pertes variables de matière organique du sol (MOS). Ces feux peuvent générer des émissions de carbone dans l'atmosphère et induire une perte significative de MOS par le biais de l'érosion hydrique dans les écosystèmes brûlés (Rubio *et al.*, 2004).

La qualité de la matière organique des cendres est impactée par la température et le niveau d'oxygène. Une combustion à des températures élevées (supérieures à 400°C) en

présence d'oxygène favorise la production de composés aromatiques de petite taille moléculaire (Wang *et al.*, 2015).

En ce qui concerne la matière organique du sol, l'horizon A (0-5 cm de profondeur) est altéré en fonction de la température du feu (Cawley *et al.*, 2017 ; De la Rosa *et al.*, 2012). À des températures élevées, il se décompose en molécules de petite taille et devient plus riche en composés azotés et en composés aromatiques polycondensés (Cawley *et al.*, 2017 ; De la Rosa *et al.*, 2012). Le premier effet visible du feu est la perte de matière organique, allant de la volatilisation de certains composés à la carbonisation de cette matière et jusqu'à son oxydation complète. Les niveaux de carbone et d'azote sont principalement affectés par le feu. En effet, le carbone est transformé en CO<sub>2</sub> et une grande quantité d'azote se volatilise lors de la combustion, et par conséquent, lorsque le sol s'assèche. Une augmentation du pool d'ions ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) après le passage du feu peut également favoriser le développement des bactéries nitrifiantes. Johnson et Curtis ont montré en 2001 que si le temps écoulé depuis le dernier feu est d'au moins dix ans, le stock de carbone organique des sols forestiers augmente significativement de 8 % dans l'horizon. Cela peut être expliqué de plusieurs manières : par l'incorporation rapide des matières minérales non brûlées (car elles sont protégées), la transformation des matières organiques fraîches en formes plus récalcitrantes, ce qui diminue la minéralisation, ou encore par l'apparition dans les sols fréquemment brûlés d'espèces fixatrices d'azote (Johnson et Curtis, 2001).

L'impact du feu peut également être examiné qualitativement. En effet, en fonction de la température du feu, différentes classes de molécules seront affectées (disparition ou modification) et dans des proportions différentes. González-Pérez et ses collègues (2004) ont répertorié les principales modifications de la matière organique induites par le feu : Déplacement des groupements oxygénés terminaux (ce qui diminue la solubilité), réduction de la longueur des chaînes carbonées (comme les alcanes, les acides gras, les alcools), cyclisation des sucres et des lipides, formation de composés azotés hétérocycliques, condensation de macromolécules de substances humiques, et production de composés pratiquement inaltérables tels que les charbons (González-Pérez *et al.*, 2004)

#### **2-2-L'impacte sur la matière minérale**

Les incendies modifient la fraction minérale du sol. Lors d'un feu intense, la combustion de la matière organique riche en cations produit des cendres également riches en cations et libère des électrons par oxydation de la matière organique. Ce processus crée un environnement réducteur, favorisant l'incorporation des cations dans le sol. Cela entraîne la réduction du fer

sous les formes  $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$  la déshydroxylation des goethites, et une augmentation du pH du sol (Nørnberg *et al.*, 2004). En conséquence, la goethite se métamorphose en maghémite. Les résidus de cette altération (nickel, aluminium et chrome) remontent à la surface dans les hématites et les maghémites, devenant ainsi disponibles pour le biote (Perrier *et al.*, 2006). Néanmoins, le nickel reste plus concentré dans le cristal de l'hématite que disponible dans le sol pour le biote (Landers et Gilkes, 2007). Dans les sols ferrallitiques brûlés, la quantité de fer est 1 à 2 % plus élevée que la normale (Nørnberg *et al.*, 2004). De plus, dans l'eau de ruissellement, on observe également un enrichissement en fer, correspondant à une augmentation de 2 à 20 fois la concentration normale (Burke *et al.*, 2013 ; Mansilha *et al.*, 2019). La mobilisation du fer dans l'eau est favorisée par le feu (Burton *et al.*, 2016).

Les concentrations d'autres métaux augmentent également dans le sol, tels que le vanadium, le manganèse, le mercure, le nickel, le cadmium et le plomb, tandis que le cobalt et le cuivre restent constants (Burton *et al.*, 2016 ; Campos *et al.*, 2016). Le sélénium et le zinc sont mobilisés grâce au feu et aux tempêtes (pluie et vent). L'un des effets les plus immédiats des incendies est la perte d'éléments minéraux dans l'atmosphère, soit par volatilisation sous forme gazeuse, soit par convection de fines particules dans la fumée. L'azote, en particulier, est vulnérable car il se volatilise à des températures relativement basses, environ 200°C, tout comme le soufre.

Plusieurs recherches ont été menées pour évaluer les pertes en éléments minéraux pendant les incendies, mais ces estimations sont très disparates en raison des différences d'intensité des feux, de la composition des combustibles et des méthodes de mesure utilisées. Les résultats sont donc difficilement comparables, d'autant plus que certains sont exprimés en kilogrammes par hectare, tandis que d'autres sont présentés en pourcentages de pertes par rapport aux quantités initiales de minéraux présentes dans le combustible. Par exemple, si l'on se penche sur les estimations des pertes d'azote lors de brûlis dirigés en forêt, elles varient de 12 kg/ha à 110 kg/ha, ce qui représente entre 33 % et 70 % de l'azote initialement présent dans le combustible (Wells, 1971).

Les recherches sur les effets à long terme d'une modification du régime des incendies sur le stock d'éléments minéraux d'un écosystème montrent que les conséquences sont davantage de nature fonctionnelle que quantitative (Wells, 1971).

---

***Chapitre 4 : stratégies de  
restauration des sols post  
incendie***

---

### 1-La restauration biologique post-incendie

#### 1-1-La replantation

La replantation est une méthode courante de restauration biologique utilisée pour restaurer les écosystèmes dégradés ou détruits. Elle implique la plantation d'espèces végétales indigènes ou adaptées à un environnement spécifique dans une zone affectée par des perturbations telles que la déforestation, les incendies de forêt, ou la dégradation des sols. Cette méthode vise à rétablir la structure végétale, la biodiversité et les fonctions écologiques de l'écosystème. La replantation peut contribuer à stabiliser les sols, à réguler le cycle de l'eau, à fournir de l'habitat et de la nourriture pour la faune locale, et à atténuer les effets des changements climatiques. Elle nécessite souvent une planification minutieuse pour sélectionner les espèces appropriées, préparer le site de plantation et assurer la survie des plantes nouvellement introduites. Selon le groupe coopératif forestier français Alliance Forêts Bois (AFB, 2024).

Lors du choix des arbres pour la replantation, plusieurs aspects doivent être pris en compte. Il est essentiel de sélectionner des variétés adaptées à la localisation géographique. De plus, l'origine des plants doit garantir une qualité génétique reconnue et leur adaptation à la région d'utilisation. La qualité des plants, incluant des critères tels que la jeunesse, la conformité et l'équilibre entre les parties aériennes et racinaires, est également importante, tout comme le respect des règles de transport pour assurer leur intégrité. Enfin, la densité de plantation doit être ajustée en fonction de l'essence sélectionnée et de la stratégie technique choisie pour favoriser une croissance optimale des arbres (Idees, 2024).

#### 1-2- L'introduction massive de microorganismes sélectionnés pour leurs activités bénéfiques

En reconnaissant l'importance cruciale des micro-organismes dans le processus de restauration des forêts, il devient possible d'orienter plus efficacement les efforts de restauration. L'introduction délibérée de microorganismes spécifiques dans le sol est une stratégie prometteuse pour améliorer sa fertilité.

La restauration biologique des forêts après les incendies, en utilisant des microorganismes, implique l'introduction ciblée de microorganismes bénéfiques dans le sol pour faciliter la récupération de l'écosystème. Il est essentiel de choisir des microorganismes qui s'adaptent aux conditions locales, afin qu'ils puissent prospérer et contribuer activement à

la santé du sol Cette approche comprend l'inoculation de sols avec des bactéries fixatrices d'azote pour augmenter la disponibilité en azote, crucial pour la croissance végétale post-incendie. De plus, l'utilisation de champignons mycorhiziens renforce l'absorption des nutriments par les plantes et accélère leur rétablissement. Les microorganismes décomposeurs sont également essentiels pour dégrader la matière organique morte, libérant ainsi des nutriments pour les plantes. En outre, certains microorganismes sont employés pour la bioremédiation des sols contaminés, contribuant ainsi à restaurer les zones touchées par les incendies. Cette approche favorise la régénération naturelle des écosystèmes forestiers tout en renforçant leur résilience aux futurs incendies et en préservant la biodiversité locale. Toutefois, des recherches approfondies et des mesures de précaution sont nécessaires pour minimiser tout impact négatif potentiel sur l'écosystème (Alabouvette et Cordier, 2018 ; Idees, 2024).

### **2-La restauration chimique des sols post incendie**

La restauration chimique des sols après un incendie peut contribuer à rétablir leur fertilité en corrigeant les déséquilibres causés par les feux. Par exemple, l'utilisation de biomasse de *Tithonia diversifolia* associée à des engrais minéraux a démontré des améliorations significatives des propriétés chimiques du sol, renforçant ainsi sa fertilité (Chabanne *et al.*, 2002).

En outre, des techniques telles que l'écobuage, qui implique la combustion partielle de la matière organique du sol, peuvent restaurer la fertilité chimique à moindre coût, notamment dans les zones où l'utilisation intensive d'engrais est limitée (Idees, 2024).

---

## *Conclusion*

---

Cette étude bibliographique sur les incendies de forêt a été menée pour cerner les multiples facettes de ce phénomène complexe et destructeur. Elle a permis de mettre en lumière les causes principales et les facteurs déterminants des incendies, y compris les influences climatiques et anthropiques, ainsi que les conditions environnementales favorisant leur déclenchement et propagation. Par la suite, nous avons plongé dans l'univers fascinant de la composition microbiologique et physicochimique du sol forestier, en étudiant minutieusement les micro-organismes qui le peuplent et leur rôle écologique essentiel. Nous avons également étudié la structure du sol et son influence sur les échanges de nutriments et le pH, soulignant l'impact profond des incendies sur ces caractéristiques.

Les recherches entreprises montrent que les incendies peuvent en effet avoir un impact significatif sur les micro-organismes du sol, tels que les bactéries, les champignons et les protozoaires. Ces perturbations peuvent modifier la fertilité du sol en raison de la perte de matière organique, la composition chimique du sol peut également être affectée par les cendres résultant de la combustion de la végétation. De plus, les incendies peuvent altérer la quantité d'eau disponible dans le sol en raison de la diminution de la capacité de rétention d'eau et de l'augmentation de l'évaporation. Ils peuvent également influencer la disponibilité en oxygène dans le sol, ce qui peut avoir un impact sur la respiration des micro-organismes du sol. Enfin, les incendies peuvent modifier le pH du sol, soit directement par les cendres qui peuvent être alcalines, soit indirectement par des changements dans la composition chimique du sol. Par ailleurs, les incendies peuvent aussi avoir des effets bénéfiques sur les écosystèmes, bien que souvent sous des conditions spécifiques. Par exemple, la combustion de la matière organique pendant un incendie peut libérer des nutriments tels que l'azote et le phosphore, qui peuvent être absorbés par le sol et utilisés par les plantes pour leur croissance. De plus, certains types de plantes et de micro-organismes sont adaptés à la chaleur et peuvent bénéficier de l'ouverture de l'espace et de la disponibilité accrue de lumière après un incendie, ce qui peut favoriser leur croissance et leur propagation. Cependant, il est important de noter que les effets positifs des incendies peuvent être contrebalancés par les effets négatifs sur d'autres aspects de l'écosystème, tels que la perte de biodiversité, la dégradation des sols et les risques accrus d'érosion et d'inondation.

Les statistiques régionales et mondiales, en particulier celles concernant l'Algérie, ont illustré l'ampleur et la fréquence croissante des incendies de forêt, soulignant l'urgence de mesures efficaces de gestion et de prévention. Les méthodes de réparation, de restauration et de

préparation du sol après un incendie, abordées sous des angles biologiques, chimiques et physiques, proposent des solutions viables et durables pour la résilience et la récupération des écosystèmes forestiers. Ces méthodes incluent la réintroduction de végétation native, l'amendement du sol pour restaurer sa fertilité et des pratiques de gestion forestière visant à réduire le risque de futurs incendies. À l'avenir, les processus bio-électrochimiques pourraient grandement contribuer à la surveillance des incendies de forêt grâce à des applications innovantes telles que les capteurs bioélectroniques qui détectent les gaz émis par les incendies, l'analyse des sols et des plantes endommagés, et les réseaux de capteurs sans fil qui surveillent en continu les conditions environnementales. Ces technologies aideront à développer des systèmes d'alerte précoce et à estimer les émissions polluantes, renforçant ainsi la capacité des autorités et des communautés à réagir rapidement et efficacement aux incendies, réduisant les dommages environnementaux et économiques.

---

## *Références bibliographiques*

---

- Ahammad M. (2014). Remediation of metalliferous soils through the heavy metal resistant plant growth promoting bacteria: Paradigms and prospects. Arab Journal of Chemistry, 7(1), p : 91-98.
- Alexandrian, D., Esnault, F., Calabri, G. (1998). Feux de forêt dans la région méditerranéenne Cet article s'inspire d'une étude préparée en vue de la réunion de la FAO sur les politiques publiques concernant les feux de forêt, 8p.
- Alliance Forêts Bois. Boisement et reboisement [en ligne]. (page consulter le 01/03/2024). <https://www.allianceforetsbois.fr/proprietaires-forestiers/travaux-de-sylviculture/boisement-et-reboisement/>.
- Anna M., Cristine C., George A., Johannes A. et Eiko E. (2016). The Ecology of Acidobacteria: Moving beyond Genes and Genomes. Front Microbiol. 2016 ; 7, p: 744.
- Aquaportail. Microbiologie du sol : définition et explications [en ligne]. (page consulter le 13/09/2023). Microbiologie du sol : définition et explications (aquaportail.com).
- Bardgett R. et Wardle D. (2010). Aboveground-belowground linkages: Biotic interactions, ecosystem processes, and global change. Austral Ecology, 37, p: 26–27.
- Baize D., Duval O. et Richard G. (2013). Les sols et leurs structures : Observations à différentes échelles. Quæ. 264 p.
- Bikoko L., Kongo J., Biongongo S., Mikobi A., Mpokama G. et BOPE Minga I. Influence de la biomasse de *Tithonia Diversifolia* combine ou non aux engrais minéraux sur la fertilité des sols sableux de la province du Kasa. Revue Congo Research Papers. DOI:10.59937/ozor9038,. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259649856>.
- Borsali, A. H., Benabdeli, K., & Gros, R. (2012). Reconstitution postincendie des propriétés physico-chimiques et microbiologiques de sols forestiers algériens (forêt de Fénouane, wilaya de Saïda). *ecologia mediterranea*, 38(1), 59-73.
- Campbell A., Schwientek P., Vishnivetskaya T., Woyke T., Levy S., Beall C., Griffen A., Leys E. et Podar M. (2014). Diversity and genomic insights into the uncultured Chloroflexi from the human microbiota. Environmental Microbiology, 16(9), p : 2635-2643.

- Centre nationale de la propriété forestière (CNPF). Le sol forestier : élément clé pour le choix des essences et la gestion durable [en ligne]. (page consulter le 26/04/2024).
- Charman A. et Delcoigne C. (1994). Le feu. Gamma. École Active. p: 32.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Philippot L. et Ranjard L. (2012). Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology*, 49, p : 63–72.
- Elridge T. Tout sur les feux de forêt : Origine, impact du changement climatique et gestion des incendies de forêt : comprendre, prévoir et agir [en ligne]. (page consulter le 05/06/2023). <https://www.meteomatics.com/fr/histoires-meteo/feux-de-foret/>.
- Eilers K., Lauber C., Knight R. et Fierer N. (2010). Shifts in bacterial community structure associated with inputs of low molecular weight carbon compounds to soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(6), p : 896-903.
- Essaid A., Parul V., Lisa S., Nathalie G., Cedric J., Hans-Peter K., Christophe C., Yder Ouhdouch., Gilles P. et van W. (2016). Taxonomy, Physiology, and Natural Products of Actinobacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* [en ligne]. (page consulter le 16/03/2024). 80(1), p : 1– 43.
- Fédération Internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge : Les incendies de forêt [en ligne]. (Consulter le 23/04/2024). <https://www.ifrc.org/fr/notre-travail/catastrophes-climat-et-crises/quest-ce-quune-catastrophe/les-incendies-foret>.
- Fortin J., Plenchette C. et Piché Y. (2016). L'essor de la nouvelle révolution verte. Les mycorhizes. Éditions Quae. 184 p.
- Galperin M. Y. (2013). Genome diversity of spore-forming Firmicutes. *Microbiology Spectrum*, 1(2), TBS-0015-2012.
- Gobat J., Aragno M. et Matthey W. Le sol vivant : Bases de pédologie, biologie des sols. (3ème édition). Science et ingénierie de l'environnement). (2010). 848 p.

- ID France TV. Les solutions innovantes pour la restauration des forêts après un incendie [en ligne]. (page consulter le 26/10/2023). <https://www.idfrancetv.fr/2023/10/26/les-solutions-innovantes-pour-la-restauration-des-forets-apres-un-incendie/>.
- Institut national d'études supérieures agronomiques de Montpellier (SupAgro). Processus écologiques - Propriétés chimiques. (S. d.). [https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/PropriChimiques\\_1.html](https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/PropriChimiques_1.html).
- Janssen P. (2006). Identifying the dominant soil bacterial taxa in libraries of 16S rRNA and 16S rRNA genes. *Applied and Environmental Microbiology*, 72, p : 1719–1728.
- Jenny H. (1980). *The soil resource: origin and behavior*. Ecological Studies 37. New York: Springer Verlag, 377 p.
- Jeune Afrique. La Banque mondiale se penche sur la question des incendies en Algérie [en ligne]. (page consulter le 21/02/2024). <https://www.jeuneafrique.com/1505914/societe/la-banque-mondiale-se-penche-sur-la-question-des-incendies-en-algerie/>.
- Khaledian, Y., Brevik, E. C., Pereira, P., Cerdà, A., Fattah, M. A., & Tazikeh, H. (2017). Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries. *Catena*, 158, 194-200.
- Lavelle P., Lattaud C., Trigo D. et Barois I. (1995). Mutualism and biodiversity in soils. In Lavelle P. et Brussaard M. *The Significance and Regulation of Soil Biodiversity*. Dordrecht: Springer, p: 23–33.
- Lechevalier H. et Lechevalier M. (1965). Classification des actinomycètes aérobies basée sur leur morphologie et leur composition chimique. *Ann Inst Pasteur*, 108, p : 662– 673.
- Letunic I. et Bork P. (2024). Nucleic Acid Extraction, Isolation, and Purification. *Nucleic Acids Res*, doi: 10.1093/nar/gkae268 | Privacy Policy.
- Ludwig W., Euzéby J., Schumann P., Buss H., Trujillo M., Kämpfer P. et Whitman W. (2012). Road map of the phylum Actinobacteria in Goodfellow M, Kämpfer P, Busse H, Trujillo M, Suzuki K, Ludwig W, Whitman W. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. New York: Springer-Verlag, p: 1–28.

- Macagnan D., Romeiro R., Souza J. et Pomella A. (2006). Isolation of actinomycetes and endospore-forming bacteria from the cacao pod surface and their antagonistic activity against the witches' broom and black pod pathogens. *Phytoparasitica*, 3, p : 122– 132.
- Madigan M. et Martinko J. (2005). *Brock Biology of Microorganisms* (11th ed.). Prentice Hall, 8(2), p : 149-150.
- Meddour-Sahar, O., Meddour, R., Leone, V., & Derridj, A. (2015). Motifs des incendies de forêt en Algérie: analyse comparée des dires d'experts de la Protection Civile et des Forestiers par la méthode Delphi. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 14(3).
- Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. Les feux de forêt [en ligne]. (page consulter le 25/03/2024). <https://www.ecologie.gouv.fr/>.
- Mohanty, P., Singh, P. K., Chakraborty, D., Mishra, S., & Pattnaik, R. (2021). Insight into the role of PGPR in sustainable agriculture and environment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 667150.
- M.T.F. (1973). *Manuel de lutte contre les feux de forêts*. Ministère des Terres et Forêts, Canada: Québec Inc., Sillery. 437 p.
- Narayanasamy P. (2011). *Microbial plant pathogens-detection and disease diagnosis: Microbial Plant Pathogens-Detection and Disease Diagnosis*. Springer, p: 1–256.
- Nasi R., Dennis R, Meijaard E., Applegate G. et Moore P. Les incendies de forêt et la diversité biologique [en ligne]. (page consulter le 06/04/2024). <https://www.fao.org/3/y3582f/Y3582F07.htm>.
- Office européen des brevets. Technologies de restauration après incendie [en ligne]. (page consulter le 06/05/2024). <https://www.epo.org/fr>.
- Organisation Mondiale pour la Protection de l'Environnement. Causes et conséquence des incendies de forêt [en ligne]. (page consulter le 25/04/2024). OMPE - Organisation Mondiale pour la Protection de l'Environnement.
- Orgiazzi A., Bardgett R., Barrios E., Steinberg, C. (2016). *Global soil biodiversity atlas*. Luxembourg: European Commission, 176 p.

- Pirrera, G., & Pluchino, A. (2017). Phytoremediation for ecological restauration and industrial ecology. In *International Symposium on Soil and Water Bioengineering in a Changing Climate Glasgow, 7th and 8th September. 2017*, p. 13).
- Pisani D., Pett W., Dohrmann M., Feuda R., Rota-Stabelli O., Timminga M., Wörheide G. et Wills M. (2015). Genomic data do not support comb jellies as the sister group to all other animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(50).
- Rigolot, É., Dupuy, J. L., Pimont, F., & Ruffault, J. (2020). Les incendies de forêt catastrophiques. In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*. 2, p : 29- 35.
- Srivastava, M. P., & Sharma, S. (2014). Potential of PGPR bacteria in plant disease management. *Biological Controls for Preventing Food Deterioration*, p : 87-116.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Polme, S., et al. (2014). Global diversity and geography of soil fungi. *Science*, 346, 1256688–1256688.
- Vandana, U. K., Singha, B., Gulzar, A. B. M., & Mazumder, P. B. (2020). Molecular mechanisms in plant growth promoting bacteria (PGPR) to resist environmental stress in plants. In *Molecular aspects of plant beneficial microbes in agriculture*. p : 221-233).
- Vincent Q., Auclerc A. et Leyval C. (2023). La biodiversité des sols. *Encyclopédie de l'Environnement* [en ligne]. (page consulter le 13/05/2024) ISSN 2555-0950. <https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/biodiversite-sols/>.
- Wells C. (1971). Effects of prescribed burning on soil chemical properties and nutrient availability dans : *Prescribed Burning Symposium Proceedings*, Asheville, North Carolina : USDA Forest Service, SE Forest Experiment Station. P : 86-99.
- Zimmerman W. (1980). Degradation of lignin by bacteria. *J Biotechnol*, 13, p: 199–13

**Année universitaire : 2023-2024**

**Présenté par : Aiouadj Fatima Zohra  
Torchi Nor Elhouda**

**Titre : Etude de l'impact des incendies sur les propriétés physicochimiques et microbiennes du sol**

**Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Ecologie Microbienne**

**Résumé**

Cette étude bibliographique met en lumière l'impact significatif des incendies sur les écosystèmes forestiers, soulignant la menace sérieuse qu'ils représentent. Les incendies exercent une influence considérable sur les propriétés physico-chimiques des sols, altérant la matière organique en cendres et entraînant une déperdition de nutriments essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Cette transformation réduit la capacité des sols à retenir l'eau et les éléments nutritifs, ce qui entrave la croissance végétale, notamment en raison de la chaleur intense et de la combustion. En ce qui concerne les propriétés microbiologiques du sol, les incendies peuvent avoir des effets variables en fonction de la sévérité de l'incendie, du type de sol et de la régénération végétale post-incendie. Ils réduisent la biomasse microbienne, modifient la diversité et la composition des communautés microbiennes, et perturbent des fonctions clés telles que la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments, affectant ainsi la fertilité du sol. La combustion de la matière organique réduit également les réserves disponibles pour les microorganismes. Enfin, les incendies peuvent modifier la structure et la stabilité du sol, ce qui influe sur l'environnement dans lequel les microorganismes prospèrent. Néanmoins, il est important de reconnaître que les incendies peuvent également avoir des répercussions positives. Ils libèrent des nutriments et encouragent la croissance de certaines plantes et microorganismes adaptés à la chaleur. De plus, grâce aux avancées technologiques modernes, des approches de restauration et de réhabilitation des forêts post-incendie sur le plan biologique et physico-chimique ont été explorées et mises en œuvre avec succès. Cette recherche revêt une importance multidimensionnelle, allant au-delà des domaines scientifiques pour englober des aspects environnementaux, agricoles, de développement durable et de santé publique. En comprenant mieux les impacts des incendies sur les sols forestiers et en développant des méthodes efficaces de récupération, nous pouvons contribuer à la préservation et à la gestion durable des écosystèmes forestiers, tout en répondant aux défis posés par le changement climatique et la conservation de la biodiversité.

**Mots-clés :** incendies de forêt, caractéristiques physicochimiques, microbiologie du sol, régénération post-incendie.

**Président du jury :** Dr CHABBI Rabah (MAA) - Université Constantine 1 Frères Mentouri).

**Encadrante :** Dr LIFA Maroua (MCB) - Université Constantine 1 Frères Mentouri).

**Examinatrice :** Dr DERABLI Bassema (MAB) - Université Constantine 1 Frères Mentouri).