



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة الشاذلي بن جديد الطارف  
Université Chadli Ben Djedid El-Tarf  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département d'Agronomie

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

**Présenté en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master 2 Recherche  
« Ecologie Forestière »**

**THEME**

**Evaluation de la dynamique spatio-temporelle de  
la régénération forestière post-incendie au niveau des  
subéraies du Parc National d'El Kala.**

**Présenté Par :**

**Mr SALMI Fayçal**

Soutenu le : 14/06/2025

# Dedicaces

Je dédie se travail

- ❖ A mon aimable mère pour tous leurs encouragement et conseils afin que je réussisse.
- ❖ A mon frère Billel, Djaber, Badri, Ziad pour tous les soutiens.
- ❖ A Ma deuxième familles Azzi et Lamia.
- ❖ A mes meilleurs amis Abdallah , Kamel et Abdel Ghani.

# Remerciements

Je remercie Allah le tout miséricordieux pour tous les bienfaits qu'il m'a accordé dans ma vie et la réalisation de ce majestueux document.

Ma profonde gratitude va vers M<sup>r</sup> TELAILIA S. Professeur au Département d'Agronomie - Faculté des Sciences de la Nature et de la vie - Université Chadli Ben Djedid El Tarf. Pour ses aides dans la réalisation de ce présent travail et surtout pour ses encouragements.

Du fond du cœur je remercie M<sup>me</sup> TELAILIA BOUTABIA L. Professeur au Département d'Agronomie - Faculté des Sciences de la Nature et de la vie - Université d'El Tarf, pour les prestigieux conseils et exceptionnel soutien.

Je remercie vivement mon encadreur M<sup>r</sup> AOUADI A. Maître de conférences « B » au Département d'Agronomie - Faculté des Sciences de la Nature et de la vie - Université d'El Tarf, pour ses aides dans la réalisation de ce présent travail.

Je remercie mon frère MDARBEL KAMEL pour son aide et tout le temps qu'il m'a consacré pour réaliser notre travail.

Je remercie vivement M<sup>me</sup> AGGOUN H, pour ses aides dans la réalisation de notre travail

Mes remerciements vont également:

\* à tous les enseignants de spécialité « Ecologie Forestière » ;

## 1. Table des matières

1. Le chêne-liège ( <i>Quercus suber</i> L.).....	6
1.1. Origine, répartition et importance écologique.....	6
1.2. Biologie et dynamique de l'espèce.....	7
1.3. Structure, classification et peuplements porteurs de semences (PPG).....	9
1.4. Exploitation, enjeux économiques et dégradation.....	10
1.5. Facteurs de dégradation des peuplements : .....	13
1.6. Typologie des subéraies et conservation .....	13
1.7. Perspectives de gestion durable.....	14
2. Les feux de forêt.....	16
2.1. Définition et caractérisation générale.....	16
2.2. Mécanismes de transfert de chaleur .....	16
2.3. Types de feux et comportement du front.....	17
2.4. Facteurs favorisant les feux en milieu méditerranéen .....	18
2.5. Impacts écologiques et socio-économiques.....	19
2.6. Stratégies de prévention et de lutte.....	20
3. Usage de la télédétection dans le domaine de la gestion des feux de forêt et de la conservation du chêne-liège.....	22
3.1. Principes et fondements de la télédétection.....	22
3.2. Capteurs utilisés pour la surveillance des feux.....	23
3.3. Applications avant, pendant et après l'incendie .....	24
3.3.1. Avant l'incendie : cartographie des zones à risque et préparation.....	24
3.3.2. Pendant l'incendie : détection en temps quasi-réel et suivi.....	25
3.3.3. Après l'incendie : cartographie des surfaces brûlées et évaluation des dégâts.....	25
3.4. Cartographie et suivi du chêne-liège .....	26
3.5. Intégration avec les données terrain et modélisation.....	26
3.6. Applications spécifiques en Algérie et dans le contexte du Parc national d'El Kala .....	27
3.7. Enjeux et perspectives .....	27
3.8. Limites et recommandations.....	28
4. Présentation de la région et du site d'étude : Parc national d'El Kala.....	29
4.1. Présentation générale.....	29
4.2. Extensions successives des sites Ramsar .....	29
4.3. Situation géographique et administrative .....	29
4.4. Statut juridique et historique de protection .....	30
4.5. Écosystèmes et occupation du sol .....	30
4.5.1. Écosystème marin.....	30

4.5.2.	Écosystème dunaire.....	31
4.5.3.	Écosystèmes lacustres et zones humides.....	31
4.5.4.	Écosystème forestier.....	31
4.5.5.	Zone de montagne et relief.....	32
4.5.6.	Évolution démographique et bilan des incendies.....	32
4.6.	Géologie et pédologie.....	32
4.6.1.	Géologie.....	32
4.6.2.	Pédologie.....	32
4.7.	Climatologie.....	33
4.7.1.	Contexte régional et évolution récente.....	33
4.7.2.	Caractéristiques locales (1988–2018).....	34
4.7.3.	Hygrométrie mensuelle (1988–2018).....	35
4.7.4.	Régimes de vent.....	35
4.7.5.	Synthèses bioclimatiques.....	36
4.7.6.	Tendances climatiques et enjeux futurs.....	36
4.7.7.	Conclusion de la section climatologique.....	38
4.8.	Biodiversité.....	39
4.8.1.	Flore.....	39
4.8.2.	Faune.....	40
4.9.	Synthèse et enjeux de conservation.....	41
4.10.	Le chêne liège de la wilaya d’El Tarf.....	43
4.11.	Les subéraies du Parc National d’El-Kala (PNEK).....	43
4.11.1.	Caractéristiques et répartition du chêne liège.....	43
4.11.2.	Typologie des subéraies.....	44
4.11.3.	Feu de forêt au niveau du PNEK.....	46
5.	Materiel et méthode.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.1.	Protocole d’inventaire forestier dans le parc national d’el kala.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
5.2.	Analyse statistique.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
6.	Résultats.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
7.	Discussion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
7.1.	Contexte écologique et particularités du chêne-liège ( <i>Quercus suber</i> )....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
7.2.	Impacts immédiats des incendies de forêt sur la végétation de chêne-liège....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
7.3.	Processus et voies de régénération post-incendie.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
7.4.	Influence des facteurs environnementaux locaux.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
7.5.	Synthèse des résultats de l’étude.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
8.	<b>Conclusion</b> .....	71

Références bibliographiques.....	73
----------------------------------	----

### Liste des figures

<b>Figure 1</b> Répartition du Chêne liège dans le monde Direct Link <a href="https://planeteliege.com/tout-sur-le-liege/un-amateur-de-climats-doux">https://planeteliege.com/tout-sur-le-liege/un-amateur-de-climats-doux</a> consulté le 08/06/2025 .....	6
<b>Figure 2</b> Description botanique de <i>Quercus suber</i> .....	8
<b>Figure 3</b> Tronc de Chêne après la levée de liège .....	12
<b>Figure 4</b> Liège après l'opération de Démasclage .....	12
<b>Figure 5</b> Types des feux de forêt (Colin & Jappiot, 2001).....	17
<b>Figure 6</b> Principe de la télédétection Lei Tian et al 2023 .....	23
<b>Figure 7</b> Diagramme pluviométrique de la région d'étude pour la période (1988-2018).....	38
<b>Figure 8</b> la répartition spatiale du chêne-liège au niveau de la wilaya d'El Tarf et incendie 2022 .....	43
<b>Figure 9</b> Représentation géographique détaillée de la répartition du chêne-liège dans la région d'El Kala .....	43
<b>Figure 10</b> Carte des peuplements forestiers du Parc National d'El-Kala .....	44
<b>Figure 11</b> Analyse comparative des séries chronologiques NDVI (2015-2025) pour 13 stations d'étude .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 12</b> Matrice de significativité des comparaisons Wilcoxon paires entre points..	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 13</b> Profil des variables environnementales (élévation, pente, hillshade, TPI, TWI) par station d'échantillonnage .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 14</b> Dénombrement des structures végétales par site : arbres morts et vivants, arbustes, jeunes semis naturels et rejets de souche.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 15</b> Ordination RDA des 13 stations en fonction des variables environnementales .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 16</b> Ajustement d'un GLM de Poisson pour le nombre d'arbres vivants en fonction du hillshade, de l'orientation et de l'altitude .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 17</b> Ajustement d'un GLM de Poisson pour le nombre d'arbres morts en fonction de l'altitude et de l'indice d'humidité topographique (TWI) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

### Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> Caractéristique du chêne liège selon (Vignes, 1990). .....	7
<b>Tableau 2</b> Exigences pédoclimatiques du chêne liège.....	9
<b>Tableau 3</b> Peuplements porte graines en Algérie.....	10

<b>Tableau 4</b> Températures moyennes mensuelles (°C), station « Lac des Oiseaux », 1988–2018 .....	34
<b>Tableau 5</b> Précipitations moyennes mensuelles (mm), station « Lac des Oiseaux », 1988–2018.....	35
<b>Tableau 6</b> Humidité relative moyenne mensuelle (%), station « Lac des Oiseaux », 1988–2018.....	35
<b>Tableau 7</b> Superficie des essences forestière du PNEK .....	39
<b>Tableau 8</b> Foyers et superficie incendiés du Chêne liège dans le Parc National d’El-Kala .....	46

### Introduction

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.) occupe une place éminente au sein des écosystèmes méditerranéens, tant pour ses fonctions écologiques que pour sa valeur socio-économique. Cette essence thermophile et héliophile se limite géographiquement au pourtour méditerranéen, incluant notamment la péninsule ibérique, le Maghreb et la côte orientale de l'Algérie (Boudy 1952 ; Quézel & Santa 1962). Les subéraies couvrant près de 2 000 000 ha à l'échelle mondiale comptent pour une part substantielle en Algérie, où leur superficie est estimée entre 375 000 ha et 450 000 ha. Cette répartition géographique restreinte s'explique par des exigences pédoclimatiques précises : le chêne-liège se développe sur des sols siliceux, depuis le niveau de la mer jusqu'à environ 1 550 m d'altitude, dans des zones où la température moyenne annuelle varie entre 13 °C et 18 °C, que les précipitations excèdent 600 mm par an et que l'humidité relative ne tombe pas en dessous de 60 % même au plus fort de la saison sèche (Belabbes 1996).

Dans ce contexte, la gestion durable des subéraies revêt une importance capitale. En effet, le substrat liégeux, isolant et imperméable, a historiquement permis une exploitation économique du liège pour la fabrication de bouteilles, de matériaux isolants et d'objets artisanaux, tout en assurant une forme de sylviculture extensible et respectueuse des sols (Zair 1989). Par ailleurs, les subéraies jouent un rôle crucial dans la préservation de la biodiversité méditerranéenne, hébergeant une faune et une flore adaptées à ces milieux semi-arides (Meddour & Sahar 2022). Elles contribuent également à la protection des sols contre l'érosion et à la régulation hydrologique en zones montagneuses et littorales (Ramade 1984).

Néanmoins, ces écosystèmes sont soumis à de nombreuses pressions, parmi lesquelles les incendies de forêt figurent en première ligne. Les changements climatiques prononcés dans la région méditerranéenne, conjugués à l'augmentation des activités humaines et à la fragmentation des habitats, ont conduit à une recrudescence de la fréquence et de l'intensité des feux (Dupuy et al. 2015). En Algérie, les années récentes ont été marquées par des épisodes d'incendies majeurs, tels que celui d'août 2022 dans la wilaya d'El Tarf, qui a ravagé près de 6 965 ha de subéraies (Arfa et al. 2019). Ces événements mettent en péril la survie des peuplements de chêne-liège, dont la capacité de résilience dépend étroitement de mécanismes de régénération souvent mal connus localement.

La régénération du chêne-liège se fait de deux manières principales :

**Par semis (reproduction sexuée)** : la production de glands, leur dispersion et la capacité des plantules à s'établir dans un environnement concurrentiel sont essentielles. Toutefois, en Algérie, cette dynamique est considérée comme déficiente, car l'absence de pratiques sylvicoles adéquates — telles que l'éclaircie régulière — limite fortement l'espace disponible pour l'établissement des semis sous couvert forestier (Belabbes 1996 ; Zair 1989).

**Par rejets de souche (reproduction végétative)** : le chêne-liège possède une capacité de drageonnement importante, particulièrement sur des racines superficielles traumatisées (Cemagref 1983 ; Belabbes 1996). Néanmoins, cette méthode reste peu exploitée localement, principalement en raison d'un déficit d'informations sur la vigueur et le rendement des rejets, et d'un manque de protocoles techniques adaptés pour favoriser ce mode de régénération.

Face aux incendies, ces deux voies de régénération peuvent être affectées de manière distincte selon la sévérité du feu, la saison de survenue et les conditions écologiques du site (composition du sol, relief, exposition). Par exemple, la formation d'une croûte calcinée après un incendie sévère peut entraver le contact semence-sol nécessaire à la germination des glands (Zeraïa 1982). Inversement, les rejets de souche sont moins dépendants de la couche superficielle du sol, mais leur succès dépend de la préservation d'une partie du cambium racinaire, ce qui n'est pas garanti lors de feux de cimes intenses (Cemagref 1983 ; Belabbes 1996).

À l'échelle locale, la topographie et l'hydroclimat jouent un rôle déterminant dans la résilience des subéraies. Des études préliminaires menées dans le Parc national d'El Kala indiquent que l'altitude (14,65 m à 298 m), la pente (1° à 26°), l'indice d'humidité topographique (TWI) et l'indice de position topographique (TPI) varient considérablement d'une station à l'autre, créant des microhabitats hétérogènes (Arfa et al. 2019). Ces gradients écologiques influencent directement le développement des rejets et la capacité des semis à s'établir après un incendie. Les zones plus humides (TWI élevé) facilitent la survie des rejets, tandis que les secteurs exposés nord et à faible TWI présentent un stress hydrique renforcé, limitant la régénération.

Dans ce contexte, la présente thèse vise à répondre à la problématique suivante : « Comment la sévérité des incendies, mesurée par l'indice Normalized Burn Ratio (NBR), et les

gradients écologiques locaux (altitude, exposition, TWI) conditionnent-ils la régénération post-incendie du chêne-liège dans la région d'El Kala ? » Pour répondre à cette question, nous avons adopté une approche intégrée reposant sur :

**La télédétection** : l'utilisation des produits MODIS Burned Area (MCD64A1.061) pour cartographier la sévérité des incendies et des données Landsat/Sentinel-2 pour suivre la dynamique de la végétation via les indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et NDII (Normalized Difference Infrared Index).

**La modélisation statistique** : une régression linéaire segmentée entre NBR et NDVI permettant d'identifier un seuil critique de sévérité au-delà duquel la régénération naturelle s'effondre.

**L'analyse multivariée** : une Analyse de Redondance (RDA) et des modèles linéaires généralisés (GLM Poisson pour les comptages d'arbres vivants/morts) basés sur douze stations forestières intégrant les variables abiotiques (altitude, exposition, pente, TWI) afin d'évaluer leur influence conjointe sur la régénération forestière.

**Les relevés de terrain** : inventaires post-incendie détaillés pour quantifier la proportion de rejets de souche versus semis naturels dans différents contextes de sévérité.

L'intérêt de cette démarche réside dans la mise en perspective de données spatiales à large échelle (télédétection) et d'observations fines au sol (relevés forestiers), ce qui permet de transcender les limites de chaque méthode prise isolément. En identifiant précisément les seuils de sévérité et en cartographiant les gradients écologiques favorables à la régénération, cette étude vise à fournir des éléments fondamentaux pour orienter la gestion adaptative des subéraies, prévenir la perte de résilience des peuplements et optimiser les actions de restauration forestière.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Quantifier la sévérité des incendies de 2022 dans la wilaya d'El Tarf, en particulier dans la région d'El Kala, à l'aide de l'indice NBR issu des produits MODIS Burned Area.
- Identifier un seuil critique de sévérité (NBR) au-delà duquel la régénération du chêne-liège par semis et rejets est significativement compromise.

-Caractériser spatialement et temporellement la régénération post-incendie via l'évolution des indices de végétation (NDVI, NDII) entre 2022 et 2024, en distinguant l'apport des rejets de souche et des semis naturels.

-Évaluer l'influence des gradients écologiques locaux (altitude, exposition, pente, TWI) sur la capacité de régénération du chêne-liège, à partir d'une Analyse de Redondance (RDA) et de modèles linéaires généralisés (GLM).

-Fournir des recommandations pratiques pour la gestion sylvicole post-incendie et la restauration des subéraies, en mettant en évidence les zones prioritaires pour la protection, le reboisement ciblé ou l'aménagement préventif.

La résilience des subéraies de *Quercus suber* face aux incendies dépend de la compréhension fine des seuils de sévérité et des conditions écologiques locales favorables à la régénération. Or, malgré l'importance économique et écologique du chêne-liège, peu d'études ont quantifié le lien précis entre la gravité d'un incendie, mesurée par NBR, et la capacité résiduelle de régénération en Algérie. De même, l'apport combiné de données satellitaires et de relevés terrain pour cerner les gradients écologiques reste fragmentaire. Cette lacune freine la mise en place d'une gestion adaptative basée sur des données objectives et spatialisées.

En ciblant la région d'El Kala, ce travail s'inscrit dans un contexte où les subéraies se trouvent au cœur d'enjeux de biodiversité, d'aménagement du territoire et de lutte contre la désertification. Les recommandations issues de cette étude permettront aux gestionnaires forestiers du Parc national d'El Kala et des services forestiers algériens :

- D'optimiser la prévention des feux dans les zones à potentiel de régénération naturel ;
- De cibler les reboisements dans les secteurs où la régénération naturelle est compromise ;
- De prioriser les aménagements sylvicoles post-incendie (élagage, lutte contre la végétation pionnière envahissante) pour favoriser le redressement des subéraies.

En définitive, l'objectif ultime est de préserver la pérennité des subéraies de *Quercus suber* en Algérie, en alliant les savoirs techniques de la télédétection, de l'écologie forestière et de la statistique multivariée pour apporter une réponse concrète à la problématique de résilience face aux feux. Cette étude fournira un cadre scientifique solide pour soutenir les

stratégies de conservation et de restauration, indispensables dans un contexte méditerranéen où les incendies s'intensifient et où les écosystèmes forestiers subissent des pressions croissan

## 2. Le chêne-liège (*Quercus suber* L.)

### 2.1. Origine, répartition et importance écologique

Le chêne-liège, *Quercus suber* L., est une espèce endémique de la région méditerranéenne occidentale, occupant une superficie globale estimée autour de 2 687 000 ha répartis sur sept pays (Afrique du Nord : Maroc 16,4 %, **Algérie 14 %**, Tunisie 5,3 % ; Europe du Sud : Portugal 32 %, Espagne 27 %, Italie 3,7 %, France 1,6 %) (Quézel & Santa, 1962 ; Boudy, 1950 ; Maire, 1961 ; Belabbes, 1996).



**Figure 1.** Répartition du Chêne liège dans le monde Direct Link <https://planeteliege.com/tout-sur-le-liege/un-amateur-de-climats-doux> consulté le 08/06/2025

En Algérie, les subéraies couvrent approximativement 230 000 ha exploitables, dont la majeure partie se trouve dans la bande côtière orientale (wilayas de Béjaïa, Jijel, Skikda, Annaba et **El Tarf**) sur des sols essentiellement siliceux bénéficiant d'un climat subhumide à humide (Boudy, 1952 ; El Antary-Tazi et al., 2008 ; Yessad, 2000). Cette répartition nord-algérienne est renforcée par la présence d'îlots plus discontinus dans le Tell central (Chlef,

Tipaza, Boumerdès), à l'ouest (Oran), en altitude (Souk Ahras, Guelma, Constantine) et autour d'Alger (Blida, Bouira, Tizi Ouzou, Médéa, Tissemsilt) (Boudy, 1952).

Le chêne-liège joue un rôle structurant pour les écosystèmes dont il est l'essence dominante, particulièrement dans les subéraies d'Afrique du Nord. Il supporte une gamme variée d'espèces associées : bruyères arborescentes (*Erica arborea*), myrtes (*Myrtus communis*), genêts (*Genista* spp.), lentisques (*Pistacia lentiscus*), arbousiers (*Arbutus unedo*), cistes (*Cistus* spp.), ronces (*Rubus unedo*), oléastres (*Olea europaea*), ainsi qu'une myriade d'herbacées et d'arbustes (Zeraia, 1982 ; Quézel, 1976). Cet assemblage floristique, riche et diversifié, constitue un cortège où chaque espèce participe à la dynamique écologique et au maintien d'une résilience relative face aux perturbations (Camus, 1936–1938 ; Belabbes, 1996).

## 2.2. Biologie et dynamique de l'espèce

Botaniquement, *Q. suber* est un arbre à feuilles persistantes, souvent un peuplier plutôt trapu en peuplements ouverts (10–15 m, exceptionnellement 20–25 m en Afrique du Nord et au Portugal), au feuillage clair laissant pénétrer la lumière et au tronc épais et richement ramifié (Vignes, 1990). Sa longévité oscille entre 250–300 ans en l'absence d'exploitation corticière, mais chute à 150–200 ans lorsque la récolte du liège est régulière (Vignes, 1990). Le cycle reproductif débute vers 15 ans, avec une fructification abondante à partir de 30 ans ; les glands mûrissent à l'automne et leur chute se prolonge jusqu'à janvier (Vignes, 1990). Les semis sont peu nombreux et délicats, sensibles à l'ombre et aux conditions édaphiques, tandis que la régénération végétative (drageons) peut être importante après traumatismes (Cemagref, 1983).

**Tableau 1.** Caractéristique du chêne liège selon (Vignes, 1990).

Hauteur moyenne	10 à 15 mètres (généralement)
Hauteur exceptionnelle	20 à 25 mètres (exceptionnellement)
Forme de la cime	Irrégulière, s'étalant en longueur
Feuillage	Clair, permettant la pénétration de la lumière
Tronc (isolé)	Entouré de larges branches étalées
Tronc (en massif)	Plus droit et plus long
Longévité (non exploitée)	250 à 300 ans
Longévité (exploitée)	Environ 150 à 200 ans



**Figure 2.** Description botanique de *Quercus suber*

Sur le plan pédoclimatique, le chêne-liège est exigeant. Il préfère un régime pluvial annuel supérieur à 600 mm (jusqu'à 1200 mm en France), avec une humidité atmosphérique ne descendant pas en dessous de 60 % en saison sèche (Quézel, 1976 ; El Antary-Tazi et al., 2008). Thermophile, il tolère mal les gelées prolongées inférieures à  $-9^{\circ}\text{C}$  et s'adapte à des températures moyennes annuelles de  $13-18^{\circ}\text{C}$  (El Antary-Tazi et al., 2008). Du point de vue édaphique, il est strictement calcifuge : il se développe sur sols acides (sableux, graveleux, rocaillieux issus de roches siliceuses : grès numidiens, sables pliocènes, micascistes, gneiss), mais ne supporte pas les substrats calcaires ou très argileux (Quézel, 1976). On le rencontre de la plaine (bord de mer) jusqu'à  $\sim 1550$  m d'altitude en Afrique du Nord, mais jamais au-delà de 700 m en France (Quézel & Santa, 1962 ; Belabbes, 1996).

Voici les exigences pédoclimatiques du *Quercus suber* selon les auteurs suivants : El Antary-Tazi et al. (2008) Boudy (1952, 1955) Cantat et al. (2005) Maire (1926) Zeraia (1981, 1982) Chollet (1997) Camus (1938) Abdelhamid (2010) Quézel et Santa (1962) Quezel (2000).

**Tableau 2.** Exigences pédoclimatiques du chêne liège

Température	Le <i>Quercus suber</i> est une espèce relativement thermophile préfère des températures douces, avec un optimum entre 13°C et 18°C. Il ne supporte pas les gelées prolongées de -9 °C.
Humidité	Le chêne-liège nécessite une humidité atmosphérique d'au moins 60%, même en saison sèche. Il exige des précipitations annuelles supérieures à 600 mm.
Lumière	Essentiellement héliophile, le chêne-liège supporte mal l'ombre. Son taux de survie et sa croissance sont significativement améliorés par un éclaircissement relatif élevé.
Altitude	Son aire de développement varie en fonction du relief, allant du niveau de la mer jusqu'à 1550 mètres en Algérie. Il prospère généralement entre 900 et 1000 mètres.
Exposition	À partir de 600 mètres d'altitude, le chêne-liège préfère les stations exposées au sud. Sur les versants nord, il est concurrencé par d'autres espèces.
Exigences Pédologiques	Le chêne-liège évite les sols argileux compacts, préférant les sols siliceux tels que les grès numidiens et les sables pliocènes.

La variabilité génétique du *Q. suber* est remarquable, en raison de son allogamie marquée. On observe de notables différences morphologiques entre écotypes et individus, notamment en ce qui concerne la qualité technologique du liège et sa vitesse de croissance (Vignes, 1990). Certains auteurs ont même décrit un « chêne occidental » (*Q. occidentalis* Gay) pour les peuplements du Sud-Ouest, se distinguant par des caractères de cupules et de maturation des glands (Vignes, 1990). Des hybridations avec d'autres chênes sont fréquentes : *Q. suber* × *Q. ilex* (*Q. morizii*) ou *Q. suber* × *Q. cerris* (*Q. crenata*) (Quézel & Santa, 1962).

### 2.3. Structure, classification et peuplements porteurs de semences (PPG)

La structure d'une forêt de chêne-liège s'analyse à travers ses peuplements : il existe en Algérie 61 Peuplements Porte-Graines (PPG) sur 2 514,5 ha, faisant du *Q. suber* l'espèce la plus représentée dans ce dispositif, suivi du chêne vert (*Q. ilex*) sur 778 ha, puis de chênes zeen (*Q. canariensis*) sur 274 ha (Belabbes, 1996). Les PPG sont des peuplements adultes, naturels ou artificiels, sélectionnés pour la production de graines de qualité : critères de classification : homogénéité, isolement (100–300 m), vitalité, âge moyen, forme régulière, état sanitaire, cimes fournies, caractère du bois analysé en laboratoire (Belabbes, 1996).

**Tableau 3.** Peuplements porte graines en Algérie

Espèce			Nombre sp	Nombre PPG	Superficie (Ha)
Code sp	Noms communs	Noms scientifiques			
15	Chêne liège	<i>Quercus suber</i>	1	61	2514,5
16	Chêne vert	<i>Quercus ilex</i>	1	19	778
17	Chêne zeen	<i>Quercus canariensis</i>	1	10	274
18	Peuplier blanc	<i>Populus alba</i>	1	11	123
19	Peuplier noir	<i>Populus nigra</i>	1	1	50 sujets
20	Peuplier de l'Euphrate	<i>Populus euphratica</i>	1	3	2ha / 80 sujets
21	Peuplier tremble	<i>Populus tremula</i>	1	1	2
22	Aulne glutineux	<i>Alnus glutinosa</i>	1	6	264
23	Eucalyptus	<i>E. astreingens/E. camaldulensis....</i>	22	32	707
24	Frêne	<i>Fraxinus</i>	1	4	28
25	Pistachier de l'Atlas	<i>Pistacia atlantica</i>	1	41	3990 sujets
26	Noyer	<i>Juglans regia</i>	1	31	–
27	Arganier	<i>Argania spinosa</i>	1	1	204
28	Acacia	<i>a-Faidherbia albida/ b- Acacia arabica....</i>	7	24	–
29	Tamaris	<i>Tamarix aphylla</i>	–	–	–
30	Olivier de l'apperine	<i>Olea lapperrinei</i>	1	4	–
31	Ficus	<i>a-Ficus ingens/b-Ficus salicifolia</i>	–	–	–
32	Taghart	<i>Maerua crassifolia</i>	1	1	–
33	Sioak-Téhok	<i>Salvadora persica</i>	1	2	–
34	Dattier du désert	<i>Balanites aegyptiaca</i>	1	9	–
35	Calotropis	<i>Calotropis procera</i>		0	–
36	Merisier	<i>Prunus avium</i>	1	1	04 sujets
Total Feuillus			46	262	4896,5 ha/ 4124 S

#### 2.4. Exploitation, enjeux économiques et dégradation

Le liège, extrait de l'écorce ("démasclage"), se forme sous l'écorce primaire quand l'arbre atteint 50–70 cm de circonférence. Le liège mâle (première formation) est de faible qualité, tandis que le liège femelle (de production) atteint une épaisseur commercialisable (30 mm) au

bout d'une douzaine d'années, puis se prélève tous les 9–15 ans (Vignes, 1990). Dans la wilaya d'El Tarf, le chêne croît sur 63 765 ha (36,7 % de la surface forestière), dont 43 000 ha à l'intérieur du Parc national d'El Kala, et la production moyenne annuelle se situe à ~9500 qx (15 000 qx en 1998), avec un rendement moyen de 2,10 qx/ha/an (Benseghir, 1995). Malgré un potentiel important, la subéraie algérienne reste sous-exploitable du fait de pratiques sylvicoles inadéquates, d'un pâturage anarchique, de levées du liège mal maîtrisées (blessures, récoltes incomplètes) et d'une absence de régénération suffisante (Belabbes, 1996).



**Figure 3.** Tronc de Chêne après la levée de liège



**Figure 4.** Liège après l'opération de Démasclage

### 2.5. Facteurs de dégradation des peuplements :

Le vieillissement des peuplements forestiers constitue un enjeu majeur, puisque plus de 60 % d'entre eux ont dépassé l'âge de 120 ans. Dans ces conditions, le rythme naturel de dix ans entre deux levées n'est plus adapté pour obtenir une épaisseur de bois marchande satisfaisante (Benseghir, 1995).

Les incendies de forêt, qu'ils soient volontaires ou accidentels, détruisent la couverture végétale et interrompent le cycle de production forestière. Cette destruction retarde fortement la régénération naturelle des peuplements et compromet la pérennité des forêts concernées (Haou, 1995).

Le surpâturage par le bétail domestique empêche la levée des semis naturels et cause des dommages aux jeunes drageons. Ces pressions pastorales limitent la capacité des forêts à se renouveler et modifient la dynamique des communautés végétales.

L'enrésinement non contrôlé — par l'introduction de conifères tels que le pin d'Alep, le pin maritime ou le pin pignon — entraîne un appauvrissement de la biodiversité autochtone et crée une compétition accrue pour les ressources en eau (Sommaire PN El Kala).

L'exploitation du liège, lorsqu'elle est réalisée avec de mauvaises pratiques, provoque des blessures sur les arbres, favorise la pourriture et augmente la vulnérabilité aux attaques parasitaires par *Armillaria mellea*, *Hypoxylon mediterraneum*, *Phytophthora cinnamomi* ou *Diplodia mutila* (Vignes, 1990 ; Belabbes, 1996).

Enfin, les peuplements sont également affectés par divers ravageurs entomologiques, notamment *Lymantria dispar*, *Coraebus florentinus*, *Cerambyx cerdo*, *Crematogaster scutellaris*, *Platype cylindrus* et *Tortrix viridana*, qui participent à la dégradation des arbres et à la réduction de leur vitalité (Belabbes, 1996).

### 2.6. Typologie des subéraies et conservation

Dans le Parc national d'El Kala, les subéraies se distinguent en deux grands types écosystémiques. Les forêts d'altitude représentent des peuplements subéraiers primitifs, parfois mêlés à *Quercus faginea* (chêne zeen), et se caractérisent par un sous-bois clairsemé et un état naturel quasi intact (Boudy, 1952 ; Yessad, 2000). En contraste, les forêts de plaine

offrent une mosaïque de situations : d'une part, on trouve des subéraies non dégradées, sous la forme de petits massifs isolés de quelques dizaines d'hectares (par exemple la subéraie au nord de l'Oubéira) ou de vastes peuplements continus tels que Nehed et Bougous ; d'autre part, les subéraies dégradées se traduisent par la formation de maquis, une strate arborée basse et un recouvrement végétal considérablement réduit (Boudy, 1952 ; Yessad, 2000).

Pour restaurer ces formations forestières, plusieurs actions sont nécessaires. Il convient tout d'abord de réviser les plans de gestion forestière afin d'y intégrer des objectifs de reconquête et de maintien de la subéraie. Le renforcement des capacités de production de plants en pépinière permettra de disposer de matériel végétal adapté pour la régénération assistée. Les travaux de terrain comprennent la régénération assistée, le semis de glands, les opérations de reboisement ainsi que les chantiers de débroussaillage et de dessouchement, destinés à éliminer les souches et à préparer le sol à l'implantation de jeunes arbres (Sommaire PN El Kala).

### **2.7.Perspectives de gestion durable**

Plusieurs axes d'intervention sont essentiels pour assurer la pérennité du chêne-liège en Algérie. Tout d'abord, il convient d'adopter des pratiques sylvicoles adaptées, en commençant par la sélection rigoureuse des peuplements producteurs de qualité (PPG). Une éclaircie progressive permettra de favoriser le semis naturel, tandis que la maîtrise du pâturage évitera la dégradation des jeunes plants. Par ailleurs, une lutte ciblée contre les maladies et ravageurs—par ultrasons ou traitements biologiques—et l'amélioration des techniques de levée du liège contribueront à accroître la productivité et la santé des arbres (Benseghir, 1995).

La protection contre les incendies constitue un autre volet majeur. L'aménagement de pare-feu bien dimensionnés et une surveillance renforcée durant la période critique de juillet à septembre sont indispensables pour prévenir les départs de feu. En complément, des campagnes de sensibilisation auprès des communautés locales permettront de réduire les feux volontaires ou accidentels (Haou, 1995 ; Conservation des forêts de la wilaya d'El Tarf, 1997).

Le reboisement et la régénération assistée doivent reposer sur des semences d'origine locale, afin de préserver l'adaptation génétique des populations. La création et la gestion

rigoureuse de pépinières garantiront un matériel sanitaire de qualité : les plants seront élevés en pépinière puis transférés en pleine terre. Après des coupes sélectives, l'encouragement du drageonnement contrôlé optimisera le renouvellement naturel du peuplement (Cemagref, 1983 ; Zair, 1989).

Un suivi écologique à long terme est enfin nécessaire pour mesurer l'efficacité de ces actions. Il s'agit notamment de mettre en place un monitoring de l'état sanitaire des peuplements, de recenser les PPG, de réaliser une cartographie précise de la répartition du chêne-liège et de suivre la régénération après chaque sinistre (Haou, 1995 ; Belabbes, 1996).

Enfin, la recherche et l'innovation doivent être encouragées. Des études approfondies sur la variabilité génétique et l'adaptation au changement climatique permettront de sélectionner des provenances performantes. Parallèlement, la valorisation des produits non ligneux (miel, plantes aromatiques) et le développement du tourisme vert offriront des débouchés économiques complémentaires, renforçant ainsi l'intérêt des communautés pour la conservation du chêne-liège (Zeraia, 1982 ; El Antary-Tazi et al., 2008)

### 3. Les feux de forêt

#### 3.1. Définition et caractérisation générale

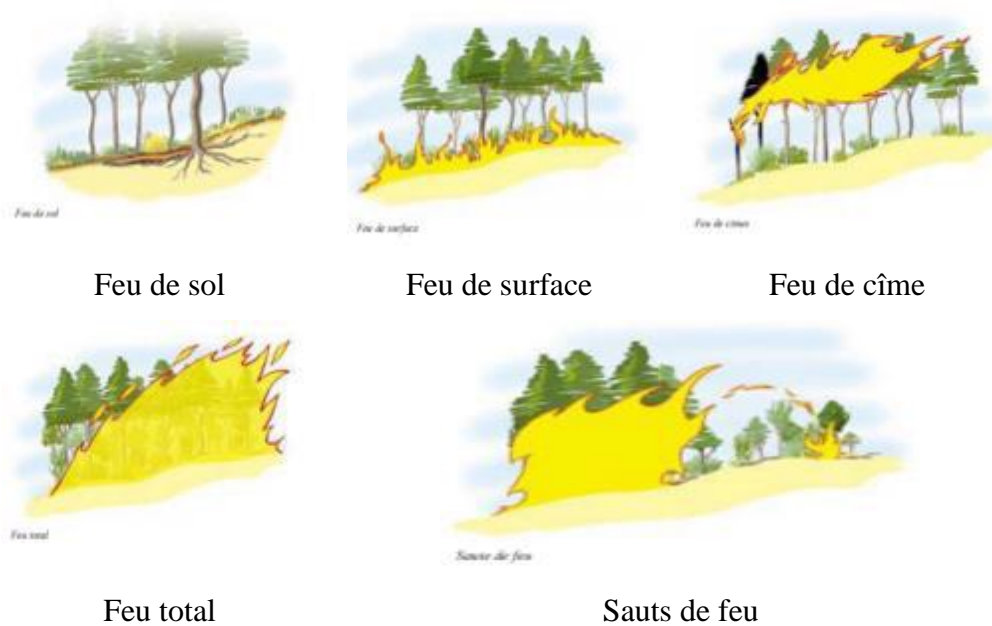
Les feux de forêt, au sens strict, correspondent à des incendies se propageant sur au moins 1 ha de végétation continue (forêts, maquis, garrigues, landes) (Zammit, 2008). Physico-chimiquement, ils résultent d'une réaction exothermique où l'oxygène atmosphérique agit comme comburant et la végétation comme combustible ; trois éléments sont requis pour que le feu s'initie : combustible (litière, arbustes, arbre), comburant ( $O_2$ ) et source d'ignition (étincelle, foudre ou chaleur intense) (Trabaud, 1985 ; Colin & Jappiot, 2001). Le processus de combustion s'enchaîne en trois phases : évaporation de l'eau contenue dans le combustible, pyrolyse (libération de gaz inflammables) et embrasement (colonne de flammes), où l'énergie dégagée entretient la réaction et préchauffe la végétation avoisinante, facilitant la propagation (Colin & Jappiot, 2001).

#### 3.2. Mécanismes de transfert de chaleur

Dans la propagation des feux de forêt, trois modes de transfert de chaleur jouent un rôle essentiel (Colin & Jappiot, 2001). Tout d'abord, la conduction correspond au transfert de chaleur par contact direct entre matériaux, qu'il s'agisse des sols ou de la végétation morte. Bien que ce mécanisme ne représente qu'environ 5 % des transferts thermiques dans les feux de végétation, il prédomine dans les feux de tourbière, où la faible aération limite les autres formes de transfert (Colin & Jappiot, 2001).

Le rayonnement thermique, quant à lui, résulte de l'émission d'ondes électromagnétiques, principalement dans l'infrarouge, par le front de flamme. Ce rayonnement chauffe rapidement la litière et la végétation préchauffée, et son intensité décroît en inverse du carré de la distance, ce qui en fait un facteur clé pour amorcer l'embrasement de la canopée (Colin & Jappiot, 2001).

Enfin, la convection concerne le transport des gaz chauds issus de la combustion vers les étages supérieurs de la forêt. Ces gaz assèchent et préchauffent la végétation en hauteur, et, sous l'effet du vent, peuvent parcourir de longues distances, accélérant ainsi considérablement la propagation du feu (Colin & Jappiot, 2001).



**Figure 5.** Types des feux de forêt (Colin & Jappiot, 2001)

### **Types de feux et comportement du front**

On distingue classiquement quatre types de feux de forêt en fonction de leur localisation et de leur comportement (Colin & Jappiot, 2001).

**-Les feux de sol** se caractérisent par une combustion lente de la litière et de l'humus, sans flammes apparentes, et peuvent parfois se propager en profondeur. Ces feux subsistent généralement sous la surface et demeurent relativement rares en climat méditerranéen en raison de la nature des combustibles et des conditions d'aération du sol (Colin & Jappiot, 2001).

**-Les feux de surface**, les plus fréquents, parcourent rapidement la litière, les herbes et les broussailles. Ils génèrent des flammes intenses, localisées près du sol, et constituent le principal mode de propagation des incendies en milieu forestier méditerranéen, menaçant à la fois la structure et la qualité du couvert végétal (Colin & Jappiot, 2001).

Les feux de cimes surviennent lorsque le front de feu atteint la canopée. On les subdivise en feux dépendants et indépendants : les premiers restent structurés par le front de surface, se propageant de manière continue du sol jusqu'aux branches, tandis que les seconds

circulent dans la cime sans lien direct avec la combustion du sol. Les feux de cimes indépendants sont souvent plus violents et plus difficiles à maîtriser, car ils bénéficient d'un combustible abondant et d'une propagation rapide dans la canopée (Colin & Jappiot, 2001).

Enfin, les sauts de feu résultent de la projection d'embrasements, tels que les cônes incandescents de pin d'Alep, qui créent des foyers secondaires à distance du front principal. Ce phénomène aggrave la sinistralité en multipliant les points d'origine du feu et en compliquant les opérations de lutte (Colin & Jappiot, 2001).

Le **régime d'incendie** (fréquence, intensité, saisonnalité, nature du combustible) structure le comportement à long terme des feux dans une région : toute altération de ce régime (changement climatique, pratiques humaines, modification végétale) peut rendre inefficaces les stratégies de lutte et transformer durablement les écosystèmes (Gill, 1975 ; Pausas & Keeley, 2014 ; Dupuy et al., 2015).

### **3.3.Facteurs favorisant les feux en milieu méditerranéen**

Le climat méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers pluvieux, favorise l'accumulation de biomasse sèche et le départ de feux (Chergui et al., 2018). Les températures élevées, la sécheresse prolongée et les vents chauds (mistral, sirocco) constituent des conditions propices à l'embrasement (très hautes températures et pluies quasi nulles entre juillet et septembre) (GWIS, 2025 ; Habib & Dehane, 2024). Aux causes naturelles (foudre, vagues de chaleur), s'ajoutent les activités humaines (décharges sauvages, brûlages agricoles incontrôlés), qui sont responsables de la majorité des déclenchements (Benhalima et al., 2023).

Plusieurs composantes locales influent fortement sur l'inflammabilité des forêts. Tout d'abord, la nature et l'humidité du combustible jouent un rôle primordial : la litière, les broussailles ou les peuplements de résineux (Pin d'Alep, Pin maritime) et de garrigue se consomment plus ou moins facilement selon leur degré d'hydratation. Les essences riches en résines, comme certains pins ou le chêne vert, présentent une inflammabilité accrue en raison de leur haute teneur en matières grasses et combustibles (Colin & Jappiot, 2001).

La composition chimique du combustible renforce cette variabilité : la proportion de résines et de composés volatils, ainsi que la teneur en phosphore du feuillage, modulent la facilité d'ignition et la vitesse de propagation du feu (Ouadah-Benkheira, 2019).

Par ailleurs, l'occupation du sol conditionne les interfaces de propagation : les zones de transition ville-forêt, les coupes rases, les pâturages et les reboisements de conifères créent des configurations de combustible et des discontinuités qui peuvent accélérer ou freiner le front de flamme (Colin & Jappiot, 2001).

La topographie constitue un autre facteur clé : les pentes fortes provoquent une convection ascendante qui préchauffe la végétation située en amont, accélérant l'avancée du front de feu (Gill, 1975).

Enfin, les conditions météorologiques — pluviométrie, humidité relative, vitesse et direction du vent, exposition au soleil — déterminent l'état d'assèchement du combustible et influencent la dynamique et l'ampleur des incendies (Colin & Jappiot, 2001).

### **3.4.Impacts écologiques et socio-économiques**

Les feux de forêt entraînent d'abord des impacts majeurs sur la flore. La destruction de la strate arborée modifie profondément la composition végétale : les espèces résilientes, telles que le chêne-liège, repoussent souvent basalement ou par drageons et renouent avec la cime dans 67,7 % des cas, tandis que les essences moins résistantes disparaissent totalement (Bouazzaoui et al., 2021 ; Aronson et al., 2012).

Au niveau du sol, la perte de la couverture protectrice expose les sols à l'érosion hydrique et perturbe les cycles des nutriments (azote, carbone), entraînant une baisse durable de la fertilité. Les extrêmes thermiques générées par le passage du front de feu détruisent la faune microbienne essentielle à la décomposition de la matière organique et au recyclage des nutriments, compromettant ainsi la régénération naturelle (Aronson et al., 2012).

Les impacts hydrologiques sont également considérables : la capacité de rétention d'eau diminue fortement, le ruissellement s'intensifie, ce qui accroît la sédimentation des réservoirs et le risque de crues torrentielles en aval (Bouregbi-I, 2014).

Sur le plan de la faune, la perte d'habitat provoque le déplacement ou la mortalité directe de nombreuses espèces sauvages et favorise la fragmentation écologique, diminuant la capacité de recolonisation des secteurs sinistrés.

Les incendies libèrent en outre d'importantes quantités de CO<sub>2</sub>, contribuant au réchauffement climatique et réduisant la séquestration de carbone des écosystèmes forestiers (Bouregbi-I, 2014).

Du point de vue socio-économique, la destruction des ressources forestières (bois, liège, gibier) entraîne des pertes agricoles et appauvrit les populations rurales, pouvant provoquer exode et conflits d'usage entre propriétaires et usagers. Les coûts élevés des opérations de lutte et de secours, ainsi que l'exposition aux fumées toxiques, constituent un danger sanitaire majeur (Goldammer, 2007).

Enfin, en Algérie, les incendies de grande ampleur de 2003 et 2012 dans la région de Kala ont ravagé des milliers d'hectares de chênaies-lièges, révélant des lacunes dans les dispositifs de prévention et poussant à la révision des plans de gestion locaux (Bouhraoua et al., 2014). Entre 2002 et 2023, la wilaya d'El Tarf figure parmi les cinq zones les plus touchées du pays, avec en moyenne 2,3 ha brûlés par km<sup>2</sup> et 0,007 feu par km<sup>2</sup>, la période critique s'étendant du 10 juillet au 30 septembre (GWIS, 2025).

### **3.5.Stratégies de prévention et de lutte**

La lutte contre les feux de forêt s'appuie sur une approche intégrée combinant prévention, action réactive et restauration post-incendie.

Sur le plan préventif, l'aménagement du territoire constitue le socle des mesures à long terme. La création et l'entretien de pare-feu — par des bandes dégagées et des parements de sols dénudés —, la pratique de coupes rases contrôlées et l'établissement de corridors défensifs permettent de limiter la continuité du combustible végétal le long du paysage (Ouadah-Benkheira, 2019). À cela s'ajoute une gestion active de la biomasse : débroussaillage mécanique et brûlages prescrits, menés hors des périodes critiques, réduisent l'accumulation de litière inflammable (Chuvienco, 2003). Parallèlement, des campagnes de sensibilisation auprès des populations riveraines, complétées par une réglementation stricte interdisant les feux de camp et les brûlages sauvages assortis de sanctions juridiques, visent à

changer les comportements à risque (Conservation des forêts de la wilaya d'El Tarf, 1997). Le suivi météorologique, reposant sur des indices d'incendie calculés à partir de données cellulaires, satellitaires et de stations au sol, fournit des alertes précoces et guide l'activation des dispositifs de surveillance. Enfin, la cartographie des zones à risque, qui combine végétation, topographie, historique des incendies et accessibilité, oriente la priorisation des secteurs à protéger (Chuvieco, 2003 ; Gill, 1975).

Lorsque le feu se déclare malgré tout, la lutte réactive mobilise rapidement des moyens de détection et d'intervention. Les tours de guet, patrouilles terrestres et aériennes ainsi que les systèmes d'alerte satellitaire permettent une identification précoce des départs de feu (Colin & Jappiot, 2001). Sur le terrain, les brigades anti-feu, équipées de camions-pompes, de mousses anti-feu et d'outils manuels (pulvérisateurs, pelles, haches), forment la première ligne de défense (Colin & Jappiot, 2001). Les moyens aériens — avions-lances, hélicoptères bombardiers d'eau et largage de retardants chimiques —, coordonnés avec les équipes au sol, optimisent l'affrontement des foyers (Flannigan & Vonder Haar, 1986). Les stratégies d'attaque varient selon l'intensité : en cas de feu de sol ou de surface, on privilégie l'attaque directe du front par de petits groupes, tandis que pour des feux plus intenses, des approches indirectes — construction de pare-feu à distance et feux de contre-feu — visent à isoler et éteindre les foyers (Colin & Jappiot, 2001).

Enfin, la restauration post-incendie permet de rétablir la résilience des écosystèmes forestiers. Elle débute par une évaluation précise des dégâts : à l'aide d'indices spectroradiométriques tels que  $\Delta\text{NBR}$  et  $\text{NBR}$ , on cartographie les zones brûlées et classe la sévérité des brûlures (Gonzalez-Alonso et al., 2004). Les travaux anti-érosifs — replantations d'espèces pionnières, installation de gabions et de cordons faiblement profonds — limitent les pertes de sol et favorisent la recolonisation végétale (Bouazzaoui et al., 2021). Le suivi de la régénération naturelle porte sur la repousse basale de *Quercus suber*, le développement des semis et la lutte contre les espèces envahissantes pour garantir un retour à une structure forestière diversifiée. Enfin, l'adaptation des pratiques sylvicoles, par la modification des cycles de démasclage et la diversification des essences, contribue à réduire la vulnérabilité future des peuplements face aux feux (Pausas & Keeley, 2014)

#### 4. Usage de la télédétection dans le domaine de la gestion des feux de forêt et de la conservation du chêne-liège

##### 4.1. Principes et fondements de la télédétection

La télédétection regroupe l'ensemble des techniques de collecte d'informations sur un objet ou un phénomène à distance, à partir de capteurs embarqués sur satellites, avions ou drones, exploitant les ondes électromagnétiques émises, transmises ou réfléchies par la surface terrestre (Lei Tian et al. 2023 ; Zammit 2008). Les systèmes de télédétection comprennent sept éléments clés : une source d'illumination (le Soleil pour les capteurs optiques et la Terre pour les capteurs thermiques), le transport de l'énergie dans l'atmosphère, l'interaction entre les ondes et la cible, l'enregistrement de l'énergie par le capteur, la transmission et le traitement des données, l'interprétation des images ainsi obtenues, et enfin leur application selon les besoins des utilisateurs (Lei Tian et al. 2023).

Deux approches principales se combinent souvent dans les applications environnementales. La première est la télédétection optique, qui repose sur l'acquisition d'images multispectrales (MOS) renseignant sur la réflectance de la végétation à différentes longueurs d'onde, notamment dans le visible et le proche infrarouge. Cette méthode permet le calcul d'indices spectroradiométriques, tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), utilisé pour estimer la vigueur de la végétation, et le NBR (Normalized Burn Ratio), qui permet de quantifier l'impact des incendies (Lei Tian et al. 2023). La seconde approche est la télédétection thermique, qui enregistre l'émissivité de la surface terrestre dans l'infrarouge thermique. Elle permet notamment la détection des foyers actifs d'incendie appelés « points chauds » ou *hot spots* (Lei Tian et al. 2023).

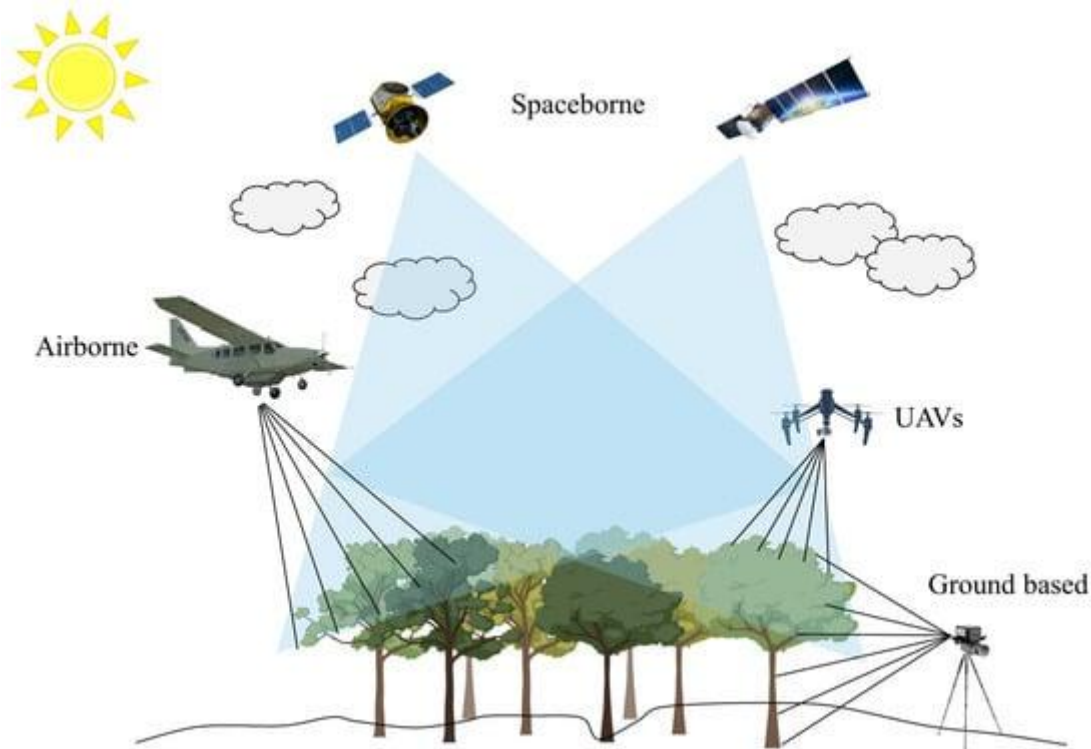


Figure6. Principe de la télédétection Lei Tian et al 2023

#### 4.2. Capteurs utilisés pour la surveillance des feux

Plusieurs capteurs satellitaires sont couramment mobilisés pour la détection, le suivi quasi-temps réel et la cartographie des zones brûlées. Les capteurs MODIS embarqués sur les satellites Terra et Aqua offrent une revisite quotidienne avec une résolution spatiale de 250 à 500 mètres. Ils permettent une détection globale des points chauds et une estimation rapide des surfaces brûlées (Lei Tian et al. 2023). Le capteur VIIRS, à bord du satellite Suomi NPP, offre une résolution améliorée d'environ 375 mètres. Il est plus sensible que MODIS et permet donc une détection plus fine, notamment pour les départs de feu de plus faible intensité (Lei Tian et al. 2023).

Les satellites Sentinel-2, du programme Copernicus, fournissent des images multispectrales à haute résolution spatiale (10 à 20 mètres). Ils permettent le calcul précis d'indices comme le NDVI et le NBR, utiles pour quantifier la perte de biomasse sèche et estimer l'intensité des feux (Lei Tian et al. 2023). De leur côté, les satellites Landsat 8 et 9, avec une résolution de 30 mètres et un cycle de revisite de 16 jours, sont particulièrement

utiles pour le suivi post-incendie détaillé. Enfin, le satellite Sentinel-1, basé sur une technologie radar en bande C (SAR), est capable de pénétrer les nuages et la fumée. Il permet ainsi de détecter les changements structurels de la végétation avant et après les incendies, y compris en conditions atmosphériques défavorables (Guillaume et al. 2017).

L'intégration de ces différentes sources de données – optiques, thermiques et radar – permet d'obtenir une représentation plus complète et dynamique de l'évolution spatio-temporelle des incendies (Lei Tian et al. 2023).

### **4.3.Applications avant, pendant et après l'incendie**

#### **4.3.1. Avant l'incendie : cartographie des zones à risque et préparation**

La télédétection est un outil essentiel pour la prévention des incendies, notamment avant la saison sèche. Elle permet la production de cartes de risque à l'échelle régionale grâce à la combinaison de plusieurs types d'informations. La topographie, obtenue par des modèles numériques de terrain (MNT), permet d'identifier les pentes et les expositions les plus sensibles au développement des feux (Chuviéco 2003). Le couvert végétal est également analysé à travers des indices de végétation tels que le NDVI et l'EVI (Enhanced Vegetation Index), mais aussi à partir d'estimations de la densité de la litière, afin d'évaluer la biomasse disponible pour la combustion (Guillaume et al. 2017).

La télédétection thermique apporte une information précieuse sur la sécheresse du sol à travers la mesure de la température de surface (Land Surface Temperature), permettant d'identifier les zones potentiellement plus inflammables (Lei Tian et al. 2023). Enfin, l'historique des incendies est intégré grâce à des bases de données internationales comme le GWIS (Global Wildfire Information System) ou l'EFFIS (European Forest Fire Information System), qui permettent de localiser les zones régulièrement touchées par les feux (GWIS 2025 ; Chuviéco 2003).

L'ensemble de ces données sert à alimenter les systèmes de prévention, à orienter les opérations de débroussaillage, à planifier la mise en place de pare-feu ainsi que la réalisation de brûlages dirigés et contrôlés (Chuviéco 2003). En Algérie, l'analyse des données MODIS sur la période 2002–2023 a révélé que la wilaya d'El Tarf figure parmi les régions les plus vulnérables face aux incendies de forêt (GWIS 2025).

#### 4.3.2. Pendant l'incendie : détection en temps quasi-réel et suivi

En phase active, la capacité de revisite quasi quotidienne de MODIS et VIIRS, couplée aux alertes automatisées de points chauds, offre une détection rapide des foyers (Lei Tian et al., 2023). Les opérateurs peuvent ainsi ajuster la répartition des moyens aériens et terrestres, définir les axes d'attaque prioritaires et anticiper les menaces sur les zones habitées (Flannigan & Vonder Haar, 1986). Les cartes d'évolution du front, générées par des traitements rapides (Google Earth Engine), aident à optimiser l'envoi des ressources (pompiers, hélicoptères, avions bombardiers d'eau) (Lei Tian et al., 2023).

L'usage de Sentinel-1 (SAR) permet de surveiller même sous couvert nuageux ou en présence d'une épaisse fumée, ce qui est crucial lors d'incendies violents où l'imagerie optique est souvent brouillée (Guillaume et al., 2017). Des systèmes d'alerte mobile (SMS, applications mobiles) peuvent être alimentés en flux quasi temps réel, améliorant la réactivité des services de secours (Lei Tian et al., 2023).

#### 4.3.3. Après l'incendie : cartographie des surfaces brûlées et évaluation des dégâts

**Après le passage des flammes, la télédétection fournit des cartes précises des zones brûlées et de l'intensité du feu grâce à la comparaison d'images pré- et post-incendie, en calculant par exemple  $\Delta\text{NBR}$  (différence de NBR) :**

Les cartes  $\Delta\text{NBR}$  permettent de classer les zones en plusieurs classes de sévérité (légère, modérée, sévère), indispensables pour planifier les travaux de restauration (reboisement, lutte contre l'érosion). L'exemple des polygones 01, 02, 03 dans la région d'El Kala illustre cette démarche : la série temporelle NBR (septembre 2022–mars 2024) montre l'évolution quantitative de la végétation dans les zones sinistrées et démontre le potentiel de régénération naturelle (Gonzalez-Alonso et al., 2004).

Les plateformes cloud (Google Earth Engine) permettent aujourd'hui de traiter ces séries temporelles sur de vastes territoires en quelques minutes, réduisant considérablement les coûts et les délais d'analyse (Lei Tian et al., 2023).

#### 4.4. Cartographie et suivi du chêne-liège

La télédétection est également utilisée pour inventorier et cartographier la répartition du chêne-liège à différentes échelles (régionale, nationale). Dans le cas du Parc national d'El Kala (PNEK), la cartographie Sentinel-2 permet de distinguer les subéraies, les milieux dunaires et les zones humides (lagunes, lacs). Les images multispectrales (10 m) servent à élaborer une carte de distribution du *Q. suber* dans la wilaya d'El Tarf (Arfa et al. 2019), en associant des classifications supervisées sur des signatures spectrales caractéristiques (NDVI élevé, indices de chlorophylle) (PFE incendie Tarf; Ramirez-Ferrer et al., 2017). Le chêne-liège présente une signature spectrale particulière au printemps (feuillage dense) et en période sèche (couleur brun-rougeâtre), facilitant son identification (Dimopoulos et al., 2006).

En Algérie, l'exploitation des données Landsat (30 m) sur une décennie (2010–2020) a permis de quantifier les pertes de couverture subérienne suite aux incendies successifs, le recul de certaines subéraies dans le Tell oriental et l'expansion potentielle vers l'étage subhumide tempéré (El Antary-Tazi et al., 2008). Le suivi multi-capteurs (Landsat + Sentinel-2) réconcilie la fréquence temporelle et la résolution spatiale (Almendros et al., 2019).

#### 4.5. Intégration avec les données terrain et modélisation

La télédétection, couplée aux données de terrain (GPS, inventaires forestiers, relevés phytosociologiques) et aux capteurs IoT (stations météorologiques, capteurs d'humidité, drones), offre des perspectives inédites pour une gestion prédictive des incendies et une conservation optimisée du chêne-liège (Lei Tian et al., 2023). L'intégration des parcelles forestières dans un Système d'Information Géographique (SIG) permet d'enrichir les attributs de chaque unité (âge, état sanitaire, densité de la litière, abondance de *Quercus suber*) et de localiser précisément les points critiques tels que les sources d'eau, les pistes d'accès et les zones de pâturage (PFE incendie Tarf). Parallèlement, le couplage des modèles de propagation de feu (FARSITE, BehavePlus) avec des données satellitaires (points chauds MODIS/VIIRS, vent, topographie) facilite la simulation de scénarios d'incendie à l'échelle du paysage, aidant ainsi à anticiper l'évolution des fronts de flammes (Lei Tian et al., 2023). Des modèles statistiques de régression et de classification, basés sur des indices de télédétection (NDVI, NBR, LST) et des facteurs biophysiques (pente, exposition, couverture végétale, humidité du sol), permettent d'inférer la probabilité d'occurrence d'un incendie et sa sévérité

potentielle (Gonzalez-Alonso et al., 2004). Enfin, la cartographie dynamique, via des dashboards actualisés en quasi-temps réel avec les flux MODIS/VIIRS, les prévisions météorologiques et les indices d'humidité, oriente efficacement l'intervention des services anti-feu (Lei Tian et al., 2023).

#### **4.6.Applications spécifiques en Algérie et dans le contexte du Parc national d'El Kala**

Dans la wilaya d'El Tarf, la télédétection se décline en applications concrètes pour le Parc national d'El Kala (PFE incendie Tarf). La cartographie de la répartition du chêne-liège repose sur l'analyse d'images Sentinel-2 (résolution 10 m) combinée à la classification supervisée validée par des points GPS, offrant une carte fine des subéraies. Pour le suivi des incendies de 2022, le calcul de  $\Delta\text{NBR}$  sur plusieurs polygones représentatifs entre septembre 2022 et mars 2024 a généré des courbes temporelles illustrant la dynamique de récupération de la végétation, ce qui permet d'évaluer l'efficacité des actions de restauration et de régénération naturelle (Quer, 2024). L'identification des zones à forte sévérité (classes 4–5 du  $\Delta\text{NBR}$ ) oriente la priorisation des travaux anti-érosifs, tels que terrassements et installation de gabions. Par ailleurs, l'étude de la corrélation entre NBR et NDVI, à travers un modèle de régression, a mis en évidence une relation robuste ( $R^2$  élevée) permettant d'estimer la perte de biomasse via des indices spectraux. Enfin, la préparation de cartographies de prévention fondées sur les images antérieures à août 2022 a permis de délimiter les zones à risque moyen ( $\text{NDVI} > 0,6$  en période sèche) et les ruptures de combustible (faible densité de litière), fournissant des bases géospatiales pour le débroussaillage et la création de pare-feu.

#### **4.7.Enjeux et perspectives**

L'adoption croissante de la télédétection redessine la gestion des incendies et la conservation du chêne-liège en Algérie. Elle réduit les délais de réaction grâce à une surveillance quasi-temps réel et une détection précoce des départs de feu, facilitant la mobilisation rapide des moyens. L'allocation optimisée des ressources, par le ciblage des zones vulnérables et l'anticipation des trajectoires potentielles, contribue à diminuer les coûts opérationnels. Le suivi longitudinal, à travers des séries temporelles de l'état post-feu sur plusieurs saisons, offre une évaluation objective de l'efficacité des travaux de restauration (semis, régénération assistée, reboisement). Par ailleurs, l'accès facilité aux données historiques (archives Landsat, MODIS de 2002 à 2025) soutient la recherche sur l'impact du

changement climatique sur la dynamique des incendies (Lei Tian et al., 2023). Enfin, l'intégration participative, via des plateformes en ligne et des applications mobiles de signalement, renforce la sensibilisation et l'implication des communautés locales.

#### **4.8.Limites et recommandations**

Malgré ses nombreux atouts, la télédétection présente des limites. Le compromis résolution spatiale vs temporelle oblige à combiner des capteurs rapides (MODIS, VIIRS) et des capteurs plus détaillés (Sentinel-2, Landsat) selon les besoins saisonniers et opérationnels (Lei Tian et al., 2023). Les obstacles atmosphériques, tels que nuages et fumées denses, limitent la détection optique, nécessitant le recours aux données radar (Sentinel-1) pour garantir une couverture continue (Guillaume et al., 2017). De plus, le calibrage des classifications et des modèles par des relevés de terrain (GPS, inventaires forestiers) est indispensable pour assurer la fiabilité des cartographies (PFE incendie Tarf). Les coûts d'accès aux infrastructures cloud (Google Earth Engine) et aux logiciels SIG, ainsi que la formation des opérateurs, constituent également des freins à une adoption généralisée.

Il est recommandé d'harmoniser l'utilisation multi-capteurs (optique, thermique, radar) pour surmonter les contraintes atmosphériques et saisonnières. La collaboration entre chercheurs, gestionnaires forestiers, services anti-feu et communautés locales doit être renforcée pour un partage efficace des données (télédétection, terrain, météorologie). Le développement d'indicateurs spectraux spécifiques au chêne-liège améliorerait la précision des cartographies (Lee et al., 2020). Enfin, la mise en place d'un système d'alerte anticipée fondé sur l'intelligence artificielle, couplé à la télédétection, permettrait de prédire à court et moyen terme les zones à risque, renforçant ainsi la résilience des écosystèmes forestiers (Lei Tian et al., 2023).

### 5. Présentation de la région et du site d'étude : Parc national d'El Kala

#### 5.1. Présentation générale

Le Parc national d'El Kala (PNEK) occupe une place majeure à l'extrême nord-est de l'Algérie. D'une superficie de 76 438 ha, il représente environ un tiers de la wilaya d'El Tarf (PNEK, 2011). Sa création officielle remonte au 23 juillet 1983 par le décret n° 83-462, complété par l'arrêté ministériel n° 005 CAR.M/129 BCCR/87 fixant le zonage interne. Cet établissement public à caractère administratif, doté de la personnalité civile et de l'autonomie financière, est placé sous la tutelle du ministère de l'Agriculture et du Développement rural.

Sa valeur exceptionnelle réside dans la mosaïque d'écosystèmes d'origine marine, dunaire, lacustre et forestière, ainsi que dans la richesse de sa biodiversité, qui en font un complexe unique dans le bassin méditerranéen (T.A.D Consult, 2011). Dès 1982, l'Algérie s'est engagée à protéger ses zones humides en inscrivant les lacs Tonga et Oubeïra à la Convention de Ramsar. Un an plus tard, la création du PNEK l'a porté parmi les premières aires protégées du nord algérien. En 1990, l'UNESCO le classa réserve de biosphère, confirmant son rôle de patrimoine mondial et l'intégrant au réseau international de suivi des écosystèmes.

#### 5.2. Extensions successives des sites Ramsar

Depuis 2002, plusieurs secteurs ont été inscrits sur la liste Ramsar des zones humides d'importance internationale. En 2002, la tourbière du lac Noir et les aulnaies d'Aïn Khiar ont été protégées, suivies en 2004 par les lacs Mellah et Bleu. En 2009, le marais de Bourdim a rejoint la liste. Parallèlement, en 2003, le projet régional MedMPA (Aires marines et côtières protégées en Méditerranée) a lancé une étude visant à définir un plan de gestion pour la future réserve marine du Parc national d'El Kala, en raison de la richesse halieutique de son domaine littoral (PNEK, 2011).

#### 5.3. Situation géographique et administrative

Le Parc national d'El Kala est situé entièrement dans la wilaya d'El Tarf, à la frontière algéro-tunisienne. Il est délimité à l'est par la frontière internationale avec la Tunisie, au nord par la mer Méditerranée, à l'ouest par l'extrémité de la plaine alluviale d'Annaba et au sud par

les contreforts des monts de la Medjerda. Administrativement, le parc recouvre la quasi-totalité de la daïra d'El Kala. Ses coordonnées approximatives sont 36° 52' N et 8° 27' E (PNEK, 2011).

### 5.4. Statut juridique et historique de protection

La protection du site s'étend sur plusieurs décennies. En 1982, les lacs Tonga et Oubeïra ont été inscrits à la Convention de Ramsar, puis le parc a été créé officiellement le 23 juillet 1983 par le décret n° 83-462. En 1990, l'UNESCO a classé la zone réserve de biosphère. Les tourbières du lac Noir et les aulnaies d'Aïn Khiar ont rejoint Ramsar en 2002, et le financement MedMPA a été obtenu en 2003 pour étudier une réserve marine. Les lacs Mellah et Bleu ont été classés en 2004, puis le marais de Bourdim en 2009. Cette protection répond à la présence d'écosystèmes rares (zones humides, forêts, dunes, milieux marins) et à une biodiversité floristique et faunistique riche. Environ 120 000 habitants vivent dans les communes riveraines (PNEK, 2011).

### 5.5. Écosystèmes et occupation du sol

Le parc présente une mosaïque d'habitats, du littoral à la montagne, en passant par des plaines humides et des dunes.

#### 5.5.1. Écosystème marin

Sur une bande côtière de 40 km, de Cap-Rosa à Cap-Segleb, se succèdent falaises, criques et plages de sable fin. Cette frange littorale est caractérisée par la présence d'herbiers de *Posidonia oceanica* et de colonies de corail rouge, qui constituent un habitat privilégié pour une faune marine diversifiée. On y recense 126 espèces de poissons osseux, 17 espèces de poissons cartilagineux, 81 espèces de mollusques, 47 crustacés, ainsi que 3 brachiopodes, 3 tuniciers, sans oublier plusieurs mammifères marins tels que *Delphinus delphis* et *Monachus monachus*, ainsi que deux espèces de tortues marines. La création d'une aire marine protégée est actuellement à l'étude (CENEAP, 2011).

### 5.5.2. Écosystème dunaire

Le cordon dunaire, qui s'étend sur 40 km de long pour une largeur variant de 1 à 4 km (altitude comprise entre 20 et 120 m), est ponctué de dépressions lacustres telles que le lac Bleu (de 0,5 à 4 ha). Ce milieu est colonisé par une végétation adaptée aux sables, notamment *Juniperus phoenicea*, *Retama bovei*, *Juniperus oxycedrus*, *Quercus coccifera*, des graminées et divers arbustes psammophiles tels que *Elytrigia juncea*. Ces espèces jouent un rôle écologique majeur dans la stabilisation des dunes et la protection de l'arrière-pays contre l'érosion côtière (CENEAP, 2011).

### 5.5.3. Écosystèmes lacustres et zones humides

La wilaya d'El Tarf abrite plusieurs zones humides d'importance internationale. Le lac des Oiseaux, avec une superficie de 120 ha en hiver et 70 ha en saison sèche, est un lac d'eau douce ceinturé de végétation riveraine. Il constitue un site d'hivernage pour plus de 8 000 canards et foulques, et un site de nidification important pour l'Érismature à tête blanche (*Oxyura leucocephala*), avec plus de 400 individus recensés (PNEK, 2002). La lagune d'El Mellah, étendue sur 860 ha, est une lagune saumâtre (salinité avoisinant 8,5 g/L), riche en prairies à salicornes et ouverte sur la mer Méditerranée. Le lac Oubeïra (2 200 ha), lac d'eau douce, accueille une forte avifaune hivernale et est bordé d'herbiers de phanérogames. Le lac Tonga (2 700 ha), marais d'eau douce relié à la mer par le canal de la Messida, est un site de nidification majeur pour l'Érismature à tête blanche, la Fuligule nyroca, plusieurs espèces de hérons, la guifette moustac et l'ibis falcinelle. Le lac Noir, d'environ 5 ha, constitue une tourbière rare en Méditerranée, entourée de chênaies-lièges et de chênaies vertes, et est reconnu pour son intérêt écologique depuis 2003 (PNEK, 2002). Les aulnaies d'Aïn Khiair, couvrant 170 ha, représentent des peuplements diversifiés d'aulnes inondables, un habitat très rare (PNEK, 2011). Enfin, le marais de Bourdim, d'une superficie de 11 ha, est classé Ramsar depuis 2009 (T.A.D Consult, 2011). Ces milieux jouent un rôle écologique fondamental comme réservoirs d'eau douce, corridors pour les migrations d'oiseaux, et aires de nidification prioritaires.

### 5.5.4. Écosystème forestier

Le parc couvre environ 54 000 ha de formations forestières, réparties en plusieurs grands types. Les subéraies à *Quercus suber* dominent sur 34 167 ha, entre 400 et 900 m d'altitude,

avec des peuplements plus ou moins altérés au sud. Les chênaies vertes (*Quercus ilex* subsp. *ballota*) occupent les stations fraîches au-delà de 900 m, se présentant sous forme de futaies denses. Le *Quercus coccifera* est typique des dunes et collines sableuses. Le pin maritime et le pin pignon sont présents en lisière sublittorale, notamment dans les zones de reboisement ponctuel. Les ripisylves, quant à elles, sont composées de *Populus alba*, *Alnus glutinosa*, *Ulmus minor* et *Fraxinus angustifolia*, et bordent les oueds. L'étagement altitudinal se manifeste par une dominance croissante de la subéraie jusqu'à 900 m, suivie de la zéenaie en futaie stable au-delà (CENEAP, 2011).

### 5.5.5. Zone de montagne et relief

Du niveau de la mer au djebel El Ghorra (1 202 m), les pentes fortes (80 %), moyennes (11 %) et faibles (9 %) forment un réseau hydrographique dense de vallées et de ravines, avec des peuplements de chêne-zeen et de pin maritime en altitude (PNEK, 2005).

### 5.5.6. Évolution démographique et bilan des incendies

Entre 1998 et 2022, la population d'El Kala est passée de 28 411 à 32 262 habitants, soit une croissance annuelle moyenne de 1,4 %. Sur la même période, la chênaie-liège communale (8 857 ha) a perdu 87,17 ha à la suite de divers incendies localisés (2001–2024), tandis que 8 769,83 ha demeurent intacts.

## 5.6. Géologie et pédologie

### 5.6.1. Géologie

Le parc recouvre des formations du secondaire (marno-calcaires des cuvettes d'Aïn Karma, Zitouna, Bouhajar, Ramel-Souk), du tertiaire (argiles et grès de Numidie) et du quaternaire (dépôts fluviaux, éoliens marins et alluvionnaires), déterminant la perméabilité et la rétention hydrique des sols (Joleaud, 1936).

### 5.6.2. Pédologie

Les sols de la région présentent une grande diversité, étroitement liée au relief et à la géologie locale. On trouve ainsi des argiles lacustres en fond de cuvette, tandis que des sols tourbeux se développent autour du lac Noir. Les zones alluvionnaires bordent les oueds, et les

prairies marécageuses reposent sur des sols organiques. Sous la chênaie, les sols sont acides et fortement lixiviés, alors que les zones humides sont entourées de sols hydromorphes. Les terrains dunaires, quant à eux, sont constitués de sables perméables. Enfin, sous le pin maritime, apparaissent des sols podzoliques insaturés. Cette pédodiversité contribue directement à la structuration d'une mosaïque complexe d'habitats, propice à une grande variété végétale et faunique.

### **5.7.Climatologie**

#### **5.7.1. Contexte régional et évolution récente**

Le nord- est de l'Algérie, incluant la région d'El Kala, est soumis à un climat de transition entre méditerranéen et semi- aride, caractérisé par une variabilité marquée des régimes de précipitations et de températures (Khoualdia et al., 2014). Au cours des dernières décennies, des ruptures significatives dans la pluviométrie ont été observées dans le bassin versant de la Medjerda (zone de référence pour le nord- est), avec une baisse notable des précipitations au cours des années 1980 et 1990, suivie d'une légère reprise entre 2001 et 2007, surtout en hiver et au printemps, à l'exception du mois de mars (Khoualdia et al., 2014). Parallèlement, on note une tendance générale à la hausse des températures extrêmes, avec une fréquence accrue de journées et de nuits chaudes, et une intensification vraisemblable des vagues de chaleur dans les décennies à venir, notamment sous le scénario d'émissions élevées (SSP5-8.5) (Abed & Selmane, 2023).

La sévérité des sécheresses a aussi augmenté : au début du XXI<sup>e</sup> siècle, des épisodes comparables aux sécheresses du début du XX<sup>e</sup> siècle ont affecté la ressource en eau. Les projections climatologiques suggèrent qu'une diminution de 15 % des précipitations pourrait entraîner une baisse de 40 % des ressources en eau de surface, compromettant le développement socio- économique et nécessitant des adaptations majeures dans la gestion hydrique (Jean- Pierre et al., 2010). Ces schémas climatiques s'inscrivent dans un contexte plus large de stress hydrique et de variabilité accrue qui touche l'ensemble du nord algérien, renforçant la nécessité de stratégies régionales d'adaptation et d'atténuation du changement climatique.

### 5.7.2. Caractéristiques locales (1988–2018)

Les paramètres climatiques du Parc national d'El Kala (PNEK) s'insèrent dans cette tendance régionale, mais présentent aussi des traits propres à la station météorologique « Lac des Oiseaux » (wilaya d'El Tarf). Sur la période 1988–2018 (Djamai, 2020 ; Guerfi, 2019), le climat y est de type méditerranéen sub-humide à hiver doux, avec une alternance marquée entre saison humide (septembre–avril) et saison sèche (mai–août).

#### Températures mensuelles (1988–2018)

- La température moyenne annuelle est d'environ 17,10 °C, avec des maxima moyens annuels de 22,10 °C et des minima moyens annuels de 14,00 °C
- Le mois le plus froid est janvier, avec une moyenne mensuelle  $(M + m)/2$  de 11,50 °C ( $M = 17,00$  °C ;  $m = 7,20$  °C).
- Le mois le plus chaud est août, où la moyenne des maximales atteint 32,50 °C ( $m = 21,40$  °C ;  $(M + m) / 2 = 27,30$  °C).
- Les contraintes thermiques varient selon l'altitude : au djebel El Ghorra (1 202 m), on enregistre 5 à 6 mois de gelée blanche par an, alors qu'au littoral, les températures descendent rarement sous 0 °C (Benyacoub, 1993).

**Tableau 4.** Températures moyennes mensuelles (°C), station « Lac des Oiseaux », 1988–2018

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
$(M + m)/2$	11,50	12,10	13,90	16,40	19,90	23,80	26,70	27,30	24,70	21,50	16,80	13,30	17,10
M	17,00	17,10	20,10	21,60	24,90	28,50	31,50	32,50	29,80	27,00	22,10	18,30	22,10
m	7,20	7,40	9,50	11,50	14,20	18,00	20,03	21,40	19,40	16,20	11,90	10,10	14,00

#### Précipitations mensuelles (1988–2018)

- Le total annuel de précipitations atteint 723,0 mm, plaçant la zone parmi les plus arrosées d'Afrique du Nord (Guerfi, 2019).

- Les précipitations sont concentrées en hiver et en automne : le mois le plus pluvieux est novembre (106,6 mm), tandis que juillet est le plus sec (1,9 mm).
- Le régime est typiquement méditerranéen : saison humide de septembre à avril (bilan hydrique positif) et saison sèche de mai à août (bilan négatif).

**Tableau 5.** Précipitations moyennes mensuelles (mm), station « Lac des Oiseaux », 1988–2018

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
P (mm)	79,2	78,1	70,0	69,5	48,4	14,3	1,9	12,2	40,2	66,9	106,6	100,0	723,0

### 5.7.3. Hygrométrie mensuelle (1988–2018)

- L'humidité relative annuelle moyenne s'élève à 76,3 %, grâce à l'effet régulateur de la mer et à la présence de nombreuses zones humides (De Belair, 1990 ; Gherib, 2018).
- Les valeurs maximales sont atteintes en décembre (80,4 %) et janvier (79,8 %), tandis que les minima se situent en juin (71,9 %) et juillet (73,2 %).
- Cette humidité soutenue durant la saison sèche atténue le stress hydrique pour la végétation et la faune, notamment dans les forêts et les marais.

**Tableau 6.** Humidité relative moyenne mensuelle (%), station « Lac des Oiseaux », 1988–2018

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
H (%)	79,8	79,6	77,4	77,2	76,2	71,9	73,2	73,1	75,3	76,3	75,6	80,4	76,3

### 5.7.4. Régimes de vent

- Trois régimes principaux coexistent :
  - Vent du nord-est, fréquent en hiver mais faible en saison chaude, chargé d'humidité ;
  - Vent du nord-ouest, plus régulier et parfois assez fort en hiver ;
  - Sirocco (vent chaud d'origine sud), majoritairement en été, favorise l'évapotranspiration, la sécheresse et augmente les risques d'incendies (Djamai, 2020).

- La force moyenne annuelle varie de 12 à 14 km/h, avec des pics d'octobre à avril.

### 5.7.5. Synthèses bioclimatiques

#### Climagramme d'Emberger (1988–2018)

- Le quotient pluviothermique  $Q_2 = 3,43 \times P / (M + m) = 3,43 \times 723 / (32,50 + 7,20) \approx 98,80$ .
- Ce résultat situe la station « Lac des Oiseaux » dans l'étage méditerranéen **sub-humide à hiver doux**.

#### Diagramme ombrothermique de Gaussen (1988–2018)

- De mai à septembre, la courbe des températures dépasse systématiquement l'histogramme des précipitations, marquant une période sèche.
- D'octobre à avril, les précipitations excèdent les températures, caractérisant la saison humide.

Ces deux outils confirment la typicité méditerranéenne du climat local, avec une sécheresse estivale régulière et une humidité hivernale durable, mais s'inscrivent aussi dans la variabilité régionale observée depuis la fin du XX<sup>e</sup> siècle (Khoualdia et al., 2014).

### 5.7.6. Tendances climatiques et enjeux futurs

Outre les caractéristiques moyennes de 1988–2018, le nord-est algérien, y compris la région d'El Kala, a subi des fluctuations interannuelles et interdécennales marquées.

#### Variabilité et rupture des régimes pluviométriques

- Dans le bassin de la Medjerda, une baisse significative des précipitations a été enregistrée durant les années 1980–1990, conduisant à des déficits hydriques majeurs pour les écosystèmes et l'agriculture (Khoualdia et al., 2014).
- Entre 2001 et 2007, une légère reprise des pluies a été observée, surtout en hiver et au printemps, à l'exception de mars, assortie d'une concentration

inhabituelle de précipitations en août, phénomène rarissime pour un climat méditerranéen (Khoualdia et al., 2014).

### **Tendances de température et vagues de chaleur**

- Les projections fondées sur les modèles CMIP6 indiquent une hausse continue des anomalies de températures extrêmes, avec des journées et des nuits chaudes plus fréquentes et prolongées (Abed & Selmane, 2023).
- Sous les scénarios à fortes émissions (SSP5-8.5), l'intensité et la durée des vagues de chaleur devraient s'accroître, mettant en péril la résistance thermique des espèces végétales méditerranéennes et aggravant le risque d'incendies (Abed & Selmane, 2023).

### **Sécheresse et ressources en eau**

- Les sécheresses intenses et persistantes, analogue à celles du début du XX<sup>e</sup> siècle, sont devenues plus fréquentes, affectant la recharge des nappes et le débit des oueds (Jean-Pierre et al., 2010).
- Une réduction anticipée de 15 % des précipitations annuelles pourrait se traduire par une diminution de 40 % des ressources en eau de surface, impactant la disponibilité pour l'irrigation, la consommation domestique et l'écosystème (Jean-Pierre et al., 2010).
- Ces contraintes hydriques croissantes exigent une adaptation des pratiques agricoles, une optimisation des usages d'eau potable et la protection renforcée des zones humides (Jean-Pierre et al., 2010).

### **Impacts sur la biodiversité**

- La combinaison d'une humidité hivernale en baisse et de températures estivales plus élevées accroît la vulnérabilité des formations végétales sub-humides (chênaies, ripisylves), uniques refuges pour de nombreuses espèces endémiques (Jean-Pierre et al., 2010).
- L'ensemble des peuplements de chêne-liège (8 857 ha au sein d'El Kala) est exposé à une hausse du risque incendie, déjà accentué par l'effet du sirocco en saison sèche (Djamai, 2020).

- Les zones humides (lacs Tonga, Oubeïra, Mellah, tourbière du lac Noir) voient leur niveau fluctuer de façon plus extrême, menaçant la survie des populations d'oiseaux d'eau et des macroinvertébrés aquatiques (Khoualdia et al., 2014).

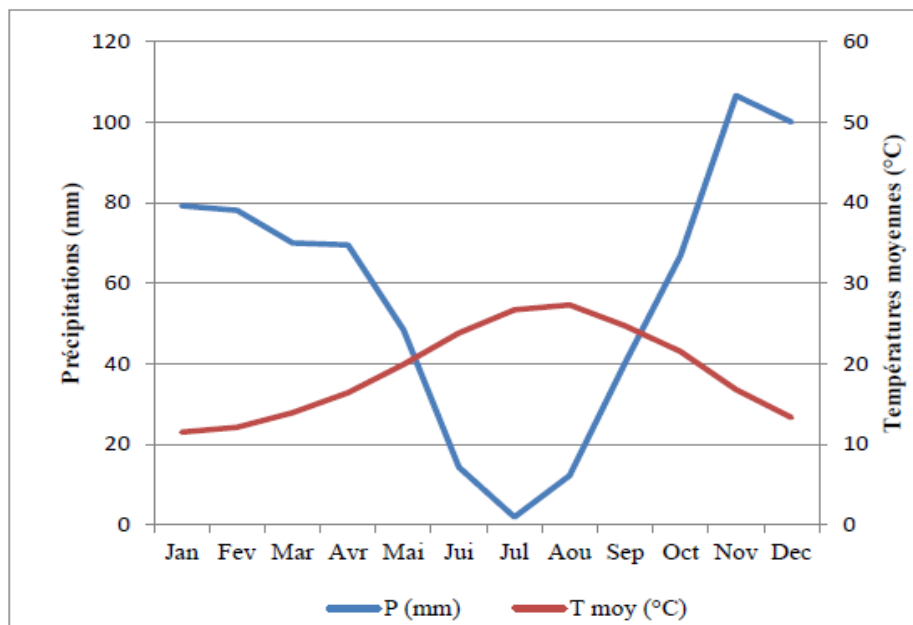


Figure 7. Diagramme pluviométrique de la région d'étude pour la période (1988-2018)

### 5.7.7. Conclusion de la section climatologique

Le Parc national d'El Kala se trouve à la confluence de phénomènes climatiques régionaux et locaux. Sur la période 1988–2018, le climat y est méditerranéen sub-humide à hiver doux, avec une répartition bien marquée des précipitations et une humidité élevée, même en saison sèche (Djamai, 2020 ; Guerfi, 2019). Cependant, ces conditions moyennes masquent des fluctuations interdécennales : baisse pluviométrique marquée dans les années 1980–1990, reprise ponctuelle au début des années 2000, et projections de vagues de chaleur plus intenses dans l'avenir (Khoualdia et al., 2014 ; Abed & Selmane, 2023). Les sécheresses répétées et la possible réduction de 15 % des précipitations pourraient réduire de 40 % les ressources en eau de surface, affectant négativement les écosystèmes forestiers et humides (Jean-Pierre et al., 2010).

La compréhension de ces dynamiques climatiques est cruciale pour évaluer l'impact sur la végétation, les incendies de chênaie-liège, et les habitats d'eau douce, et pour orienter des mesures de conservation adaptées. Ces informations serviront de base pour analyser comment

*Pica mauritanica* réagit aux contraintes thermiques et hydriques, tant au niveau de la disponibilité des ressources qu'au sein de ses microhabitats de nidification.

## 5.8. Biodiversité

### 5.8.1. Flore

Selon (CENEAP, 2011) Le Parc National d'El Kala (PNEK) abrite une richesse floristique remarquable, avec près de 917 espèces végétales recensées, ce qui représente environ un tiers de la flore algérienne. Cette biodiversité comprend environ 780 espèces de phanérogames (spermaphytes), soit près de 30 % des spermaphytes d'Algérie, ainsi que plusieurs espèces de cryptogames, dont 30 espèces de fougères, 98 espèces de champignons et 114 espèces de lichens. La flore du parc est dominée par les angiospermes, structurées en plusieurs séries végétales distinctes selon l'altitude, l'exposition et le type de sol.

La série du chêne-liège (*Quercus suber*) couvre environ 34 167 hectares, principalement entre 400 et 900 m d'altitude, formant des futaies denses sur les versants nord et nord-est. Le chêne-zeen (*Quercus ilex* subsp. *ballota*) est présent dans les stations fraîches du djebel El Ghorra, à plus de 900 m. Le chêne-kermès (*Quercus coccifera*) colonise les dunes littorales, notamment les dunes fixées. Le pin maritime (*Pinus pinaster*) apparaît souvent en mélange avec la subéraie dans la bordure littorale orientale. L'oléo-lentisque (*Pistacia lentiscus*) pousse sur les collines incultes, les talus de routes et les bordures d'oueds. Enfin, les ripisylves, selon la litologie, le substrat et la topographie, accueillent des peupliers (*Populus alba*), des aulnes (*Alnus glutinosa*), des ormes (*Ulmus minor*) et des frênes (*Fraxinus angustifolia*). Dans les étages plus élevés, la végétation à base de chêne-zeen devient plus homogène et régulière. Les plaines anthropisées accueillent également des reboisements ponctuels de pin pignon et d'eucalyptus.

**Tableau 7.** Superficie des essences forestière du PNEK

Essence Commune	Chêne liège	Chêne zeen	Eucalyptus	Pin Maritime	Peuplier	Oléastre	Aulnaie	Autre	Maquis	Vide
Ain Assel	2727	00	2140	00	130	05	00	10	1437	23
Bougous	10255	1156	00	00	60	13	00	15	4535	105
El-Tarf	2991	00	3690	354	30	00	05	30	1431	18

<b>El-Kala</b>	8857	00	2283	4127	35	15	132	15	3542	180
<b>Souarekh</b>	4182	06	00	350	80	50	00	18	2070	00
<b>Ramel Souk</b>	2447	00	500	00	48	60	00	30	585	30
<b>El-Aioun</b>	2482	08	00	20	57	16	00	30	536	10
<b>Berrihane</b>	38	00	00	7195	190	00	525	35	2846	910
<b>Bouteldja</b>	18	00	20	1430	10	10	66	57	5608	265
<b>Total</b>	33997	1170	8633	13476	640	169	728	240	22590	1541

Source : Conservation des Forêts

### 5.8.2. Faune

Selon (CENEAP, 2011) La faune du PNEK présente également une grande richesse. On y recense 43 espèces de mammifères sur les 90 présentes à l'échelle nationale, dont 7 espèces de chiroptères. Parmi les mammifères les plus notables figurent *Atelerix algirus* (hérisson algérien), *Crocidura russula* (musaraigne commune), *Pipistrellus kuhlii* (chauve-souris), *Lutra lutra* (loutre d'Europe), *Caracal caracal*, *Leptailurus serval*, *Sus scrofa* (sanglier), *Cervus elaphus barbarus* (cerf de Barbarie) et *Monachus monachus* (phoque moine) (Telailia, 1990 ; Fekroune, 1998).

L'avifaune y est tout aussi remarquable, avec 204 espèces d'oiseaux recensées, dont 189 fréquentent le parc régulièrement et 135 sont considérées comme nicheuses (Chalabi, 1990 ; Benyacoub, 1993 ; Belhadj, 1996 ; Telailia, 2002). Cette diversité inclut de nombreuses espèces d'oiseaux d'eau comme les canards, foulques et limicoles, parfois en milliers d'individus en période d'hivernage. Certaines espèces rares y nichent, telles que l'Érismature à tête blanche, le Fuligule nyroca, l'ibis falcinelle, la guifette moustac, ou encore diverses espèces de hérons coloniaux.

Concernant les reptiles et amphibiens, 24 espèces ont été recensées sur les 82 présentes à l'échelle nationale. Cela comprend 7 espèces d'amphibiens, dont *Discoglossus pictus* et *Bufo bufo* (Rouag, 1999), ainsi que 23 espèces de reptiles incluant serpents, lézards et tortues, dont certaines sont endémiques ou en limite de leur aire de répartition.

La diversité des invertébrés est également impressionnante, avec un total de 823 espèces, dont 523 espèces d'insectes. Les zones humides comme le lac Tonga abritent à elles seules

170 espèces d'invertébrés aquatiques (Telailia, 1990), tandis que des odonates ont été observés au lac Bleu et à Oubeïra (Cheriak, 1993 ; Bouguessa, 1993), accompagnés d'une grande variété de coléoptères et de lépidoptères.

La faune marine n'est pas en reste, avec 126 espèces de poissons osseux, 17 espèces de poissons cartilagineux, 81 espèces de mollusques, 47 espèces de crustacés, ainsi que 3 espèces de brachiopodes, 3 espèces de tuniciers, 4 mammifères marins dont *Delphinus delphis* et *Monachus monachus*, et deux tortues marines : *Caretta caretta* et *Chelonia mydas*. Plusieurs de ces taxons sont endémiques ou quasi endémiques à la région, et certains ne subsistent plus ailleurs en Algérie, comme le cerf de Barbarie.

### 5.9.Synthèse et enjeux de conservation

Le Parc national d'El Kala représente aujourd'hui un véritable sanctuaire pour la biodiversité méditerranéenne. Cette richesse s'explique par la présence d'une mosaïque d'écosystèmes incluant les zones littorales, dunaires, humides et forestières, sous un climat méditerranéen sub-humide caractérisé par des hivers doux, des étés chauds, une pluviométrie annuelle moyenne de 723 mm et une hygrométrie de 76,3 %. La topographie variée, allant du niveau de la mer jusqu'au djebel El Ghorra (1 202 m), favorise la diversité des milieux, de même que la géologie complexe (secondaire, tertiaire et quaternaire) qui engendre des sols variés, propices à la diversification des communautés végétales.

La richesse faunistique est exceptionnelle, avec 43 espèces de mammifères, 204 espèces d'oiseaux nicheurs, 24 espèces de reptiles et amphibiens, 823 espèces d'invertébrés terrestres et aquatiques, ainsi qu'une importante biodiversité marine. Toutefois, cette biodiversité est menacée par l'urbanisation croissante du littoral, la pression sur les zones humides à cause des activités agricoles et du prélèvement d'eau, l'intensification des incendies de forêt, ainsi que l'introduction d'espèces exotiques comme les eucalyptus.

Les principaux enjeux de conservation du PNEK sont multiples. Il est prioritaire de protéger les zones humides par la régulation des niveaux d'eau, une gestion durable des pratiques agricoles et pastorales, et la sauvegarde des statuts Ramsar. La conservation des forêts nécessite une lutte efficace contre la coupe illégale, la prévention des incendies, et la limitation des reboisements inadaptés. Le littoral et les zones marines doivent faire l'objet d'aménagements spécifiques, incluant la création d'aires marines protégées, la régulation de

la pêche artisanale et la lutte contre la pollution. Il est également crucial de maintenir la connectivité écologique entre les zones humides, les dunes et les massifs forestiers, pour garantir la libre circulation des espèces terrestres et aviaires. Enfin, la biodiversité doit être régulièrement suivie à travers des inventaires, le suivi des populations d'espèces menacées (comme les carnivores, chiroptères, et oiseaux d'eau), ainsi qu'un contrôle rigoureux des pressions anthropiques.

### 5.10. Le chêne liège de la wilaya d'El Tarf

La carte illustre l'impact des feux de forêts de l'année 2022 sur les subiraies de la wilaya d'el Tarf

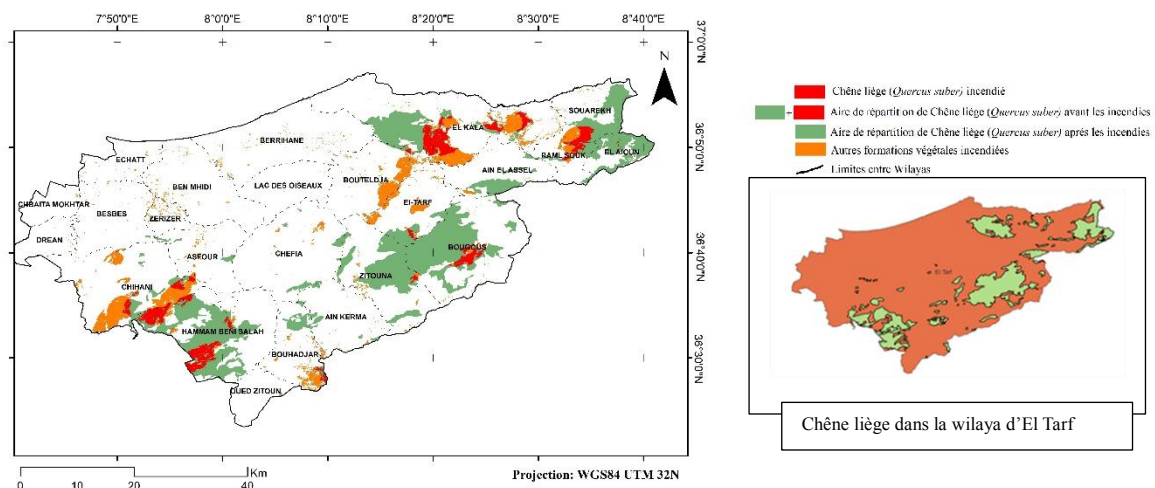


Figure 8. la répartition spatiale du chêne-liège au niveau de la wilaya d'El Tarf et incendie 2022

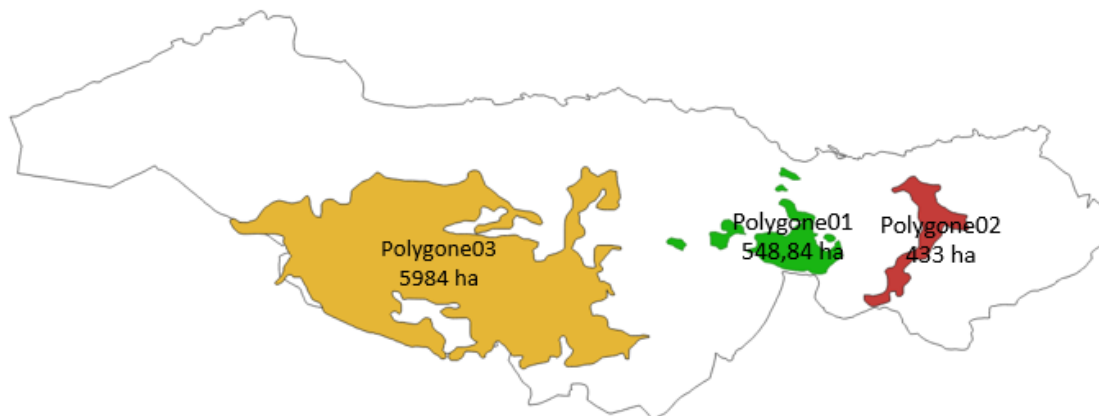


Figure 9. Représentation géographique détaillée de la répartition du chêne-liège dans la région d'El Kala

### 5.11. Les subéraies du Parc National d'El-Kala (PNEK)

#### 5.11.1. Caractéristiques et répartition du chêne liège

Le *Quercus suber* (chêne liège) constitue l'essence arborée prédominante du PNEK. Il se développe principalement sur les collines et les plaines, trouvant son optimum de croissance sur les grès et argiles numidiens. Sur le littoral, le chêne liège forme un faciès thermophile tandis qu'en altitude il évolue dans un faciès plus humide.

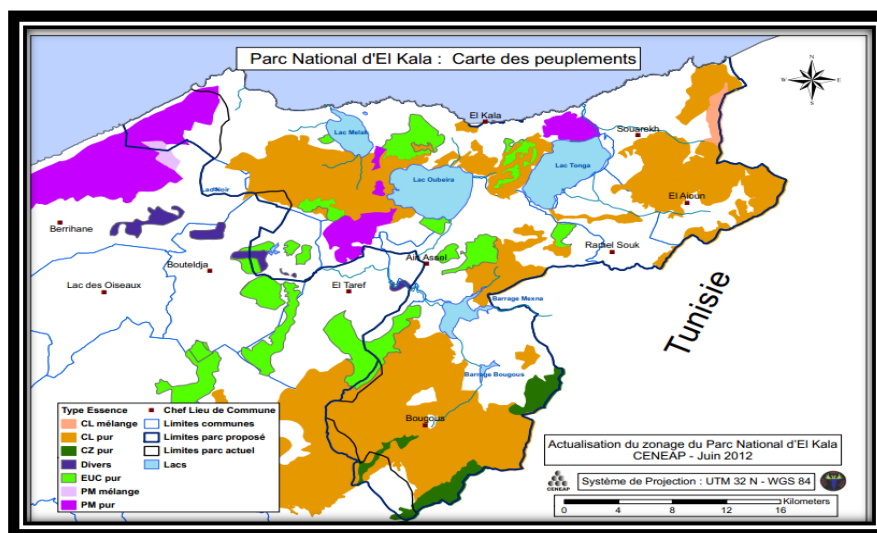


Figure 10. Carte des peuplements forestiers du Parc National d'El-Kala

### 5.11.2.

#### Typologie des subéraies

#### Types de subéraies et leurs caractéristiques principales

Les subéraies du PNEK se répartissent en deux grands types :

On distingue plusieurs types de subéraies en fonction de leur localisation et de leur état de conservation.

- **Forêt d'altitude** : Il s'agit d'un peuplement de chêne-liège localisé en altitude, souvent mêlé occasionnellement à du *Quercus faginea* (chêne zeen). Cette subéraie se distingue par une structure forestière encore primitive, avec un sous-bois clairsemé et une absence quasi totale d'interventions humaines, notamment aucune coupe.
- **Forêt de plaine** : On y distingue deux sous-types selon le degré de dégradation :
  - **Subéraie non dégradée** : Ce type regroupe soit de petits massifs isolés, de quelques dizaines d'hectares, enclavés dans le maquis (comme la subéraie au nord de l'Oubéira), soit de grands peuplements continus comme ceux de Nehed ou Bougous.

- **Subéraie dégradée** : Elle prend la forme d'un maquis, avec une strate arborée basse et un recouvrement végétal moyen, signe d'une dégradation avancée de la structure forestière d'origine.

### **Conclusion**

La présentation détaillée du Parc national d'El Kala met en évidence la richesse et la complexité de ses milieux naturels : du littoral aux massifs forestiers, en passant par les dunes et les zones humides. Les données géographiques, géologiques, pédologiques et climatiques démontrent comment se sont structurées les communautés végétales et animales. La mosaïque d'habitats disponibles, associée à une pression humaine croissante, rend cruciale la compréhension fine des caractéristiques du milieu, de ses enjeux de conservation et des interactions entre facteurs abiotiques et biotiques, qui seront au cœur des chapitres suivants.

5.11.3. Feu de forêt au niveau du PNEK

Tableau 8. Foyers et superficie incendiés du Chêne liège dans le Parc National d'El-Kala

Année Commune	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Totaux
El-Kala	00	00	20,5	00	03,53	01,4	24,5	23,22	00	0,02	02,5	10	01,5	00	00	87,17
El-Aioun	00	15	8,905	02	0,02	09,05	05,52	0,005	00	00	1,051	41,56	03,75	01	02	90,311
Ramel Souk	00	00	0,5	00	00	00	06	84,5	00	00	0,5	01,03	00	00	00	92,53
Souarekh	00	08	00	00	00	00	00	00	00	00	00	03,5	00	02	05	18,5
Ain Assel	00	23	00	00	01,5	00	0,5	05	00	0,03	134,5	00	00,32	00	00	164,85
Bougous	0,05	53	103,68	00	01	01,05	22,08	177,05	00	3,525	5,686	32,17	13,06	09,5	2,55	424,401
El-Tarf	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	10	00	68	78
Bouteldja	00	00	00	00	00	0,5	0,05	00	00	00	00	00	00	00	00	0,55
Berrihane	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
<b>Totaux</b>	0,05	99	133,585	02	06,05	12,45	58,65	289,775	00	3,575	144,237	88,26	28,63	12,5	77,55	<b>956,312</b>

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.) occupe une place éminente au sein des écosystèmes méditerranéens, tant pour ses fonctions écologiques que pour sa valeur socio-économique. Cette essence thermophile et héliophile se limite géographiquement au pourtour méditerranéen, incluant notamment la péninsule ibérique, le Maghreb et la côte orientale de l'Algérie (Boudy 1952 ; Quézel & Santa 1962). Les subéraies couvrant près de 2 000 000 ha à l'échelle mondiale comptent pour une part substantielle en Algérie, où leur superficie est estimée entre 375 000 ha et 450 000 ha. Cette répartition géographique restreinte s'explique par des exigences pédoclimatiques précises : le chêne-liège se développe sur des sols siliceux, depuis le niveau de la mer jusqu'à environ 1 550 m d'altitude, dans des zones où la température moyenne annuelle varie entre 13 °C et 18 °C, que les précipitations excèdent 600 mm par an et que l'humidité relative ne tombe pas en dessous de 60 % même au plus fort de la saison sèche (Belabbes 1996).

Dans ce contexte, la gestion durable des subéraies revêt une importance capitale. En effet, le substrat liégeux, isolant et imperméable, a historiquement permis une exploitation économique du liège pour la fabrication de bouteilles, de matériaux isolants et d'objets artisanaux, tout en assurant une forme de sylviculture extensible et respectueuse des sols (Zair 1989). Par ailleurs, les subéraies jouent un rôle crucial dans la préservation de la biodiversité méditerranéenne, hébergeant une faune et une flore adaptées à ces milieux semi-arides (Meddour & Sahar 2022). Elles contribuent également à la protection des sols contre l'érosion et à la régulation hydrologique en zones montagneuses et littorales (Ramade 1984).

Néanmoins, ces écosystèmes sont soumis à de nombreuses pressions, parmi lesquelles les incendies de forêt figurent en première ligne. Les changements climatiques prononcés dans la région méditerranéenne, conjugués à l'augmentation des activités humaines et à la fragmentation des habitats, ont conduit à une recrudescence de la fréquence et de l'intensité des feux (Dupuy et al. 2015). En Algérie, les années récentes ont été marquées par des épisodes d'incendies majeurs, tels que celui d'août 2022 dans la wilaya d'El Tarf, qui a ravagé près de 6 965 ha de subéraies (Arfa et al. 2019). Ces événements mettent en péril la survie des peuplements de chêne-liège, dont la capacité de résilience dépend étroitement de mécanismes de régénération souvent mal connus localement.

La régénération du chêne-liège se fait de deux manières principales :

**Par semis (reproduction sexuée) :** la production de glands, leur dispersion et la capacité des plantules à s'établir dans un environnement concurrentiel sont essentielles. Toutefois, en Algérie, cette dynamique est considérée comme déficiente, car l'absence de pratiques sylvicoles adéquates — telles que l'éclaircie régulière — limite fortement l'espace disponible pour l'établissement des semis sous couvert forestier (Belabbes 1996 ; Zair 1989).

**Par rejets de souche (reproduction végétative) :** le chêne-liège possède une capacité de drageonnement importante, particulièrement sur des racines superficielles traumatisées (Cemagref 1983 ; Belabbes 1996). Néanmoins, cette méthode reste peu exploitée localement, principalement en raison d'un déficit d'informations sur la vigueur et le rendement des rejets, et d'un manque de protocoles techniques adaptés pour favoriser ce mode de régénération.

Face aux incendies, ces deux voies de régénération peuvent être affectées de manière distincte selon la sévérité du feu, la saison de survenue et les conditions écologiques du site (composition du sol, relief, exposition). Par exemple, la formation d'une croûte calcinée après un incendie sévère peut entraver le contact semence-sol nécessaire à la germination des glands (Zeraïa 1982). Inversement, les rejets de souche sont moins dépendants de la couche superficielle du sol, mais leur succès dépend de la préservation d'une partie du cambium racinaire, ce qui n'est pas garanti lors de feux de cimes intenses (Cemagref 1983 ; Belabbes 1996).

À l'échelle locale, la topographie et l'hydroclimat jouent un rôle déterminant dans la résilience des subéraies. Des études préliminaires menées dans le Parc national d'El Kala indiquent que l'altitude (14,65 m à 298 m), la pente (1° à 26°), l'indice d'humidité topographique (TWI) et l'indice de position topographique (TPI) varient considérablement d'une station à l'autre, créant des microhabitats hétérogènes (Arfa et al. 2019). Ces gradients écologiques influencent directement le développement des rejets et la capacité des semis à s'établir après un incendie. Les zones plus humides (TWI élevé) facilitent la survie des rejets, tandis que les secteurs exposés nord et à faible TWI présentent un stress hydrique renforcé, limitant la régénération.

Dans ce contexte, la présente thèse vise à répondre à la problématique suivante : « Comment la sévérité des incendies, mesurée par l'indice Normalized Burn Ratio (NBR), et les gradients écologiques locaux (altitude, exposition, TWI) conditionnent-ils la régénération post-incendie du chêne-liège dans la région d'El Kala ? » Pour répondre à cette question, nous avons adopté une approche intégrée reposant sur :

**La télédétection** : l'utilisation des produits MODIS Burned Area (MCD64A1.061) pour cartographier la sévérité des incendies et des données Landsat/Sentinel-2 pour suivre la dynamique de la végétation via les indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et NDII (Normalized Difference Infrared Index).

**La modélisation statistique** : une régression linéaire segmentée entre NBR et NDVI permettant d'identifier un seuil critique de sévérité au-delà duquel la régénération naturelle s'effondre.

**L'analyse multivariée** : une Analyse de Redondance (RDA) et des modèles linéaires généralisés (GLM Poisson pour les comptages d'arbres vivants/morts) basés sur douze stations forestières intégrant les variables abiotiques (altitude, exposition, pente, TWI) afin d'évaluer leur influence conjointe sur la régénération forestière.

**Les relevés de terrain** : inventaires post-incendie détaillés pour quantifier la proportion de rejets de souche versus semis naturels dans différents contextes de sévérité.

L'intérêt de cette démarche réside dans la mise en perspective de données spatiales à large échelle (télédétection) et d'observations fines au sol (relevés forestiers), ce qui permet de transcender les limites de chaque méthode prise isolément. En identifiant précisément les seuils de sévérité et en cartographiant les gradients écologiques favorables à la régénération, cette étude vise à fournir des éléments fondamentaux pour orienter la gestion adaptative des subéraies, prévenir la perte de résilience des peuplements et optimiser les actions de restauration forestière.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

-Quantifier la sévérité des incendies de 2022 dans la wilaya d'El Tarf, en particulier dans la région d'El Kala, à l'aide de l'indice NBR issu des produits MODIS Burned Area.

- Identifier un seuil critique de sévérité (NBR) au-delà duquel la régénération du chêne-liège par semis et rejets est significativement compromise.
- Caractériser spatialement et temporellement la régénération post-incendie via l'évolution des indices de végétation (NDVI, NDII) entre 2022 et 2024, en distinguant l'apport des rejets de souche et des semis naturels.
- Évaluer l'influence des gradients écologiques locaux (altitude, exposition, pente, TWI) sur la capacité de régénération du chêne-liège, à partir d'une Analyse de Redondance (RDA) et de modèles linéaires généralisés (GLM).
- Fournir des recommandations pratiques pour la gestion sylvicole post-incendie et la restauration des subéraies, en mettant en évidence les zones prioritaires pour la protection, le reboisement ciblé ou l'aménagement préventif.

La résilience des subéraies de *Quercus suber* face aux incendies dépend de la compréhension fine des seuils de sévérité et des conditions écologiques locales favorables à la régénération. Or, malgré l'importance économique et écologique du chêne-liège, peu d'études ont quantifié le lien précis entre la gravité d'un incendie, mesurée par NBR, et la capacité résiduelle de régénération en Algérie. De même, l'apport combiné de données satellitaires et de relevés terrain pour cerner les gradients écologiques reste fragmentaire. Cette lacune freine la mise en place d'une gestion adaptative basée sur des données objectives et spatialisées.

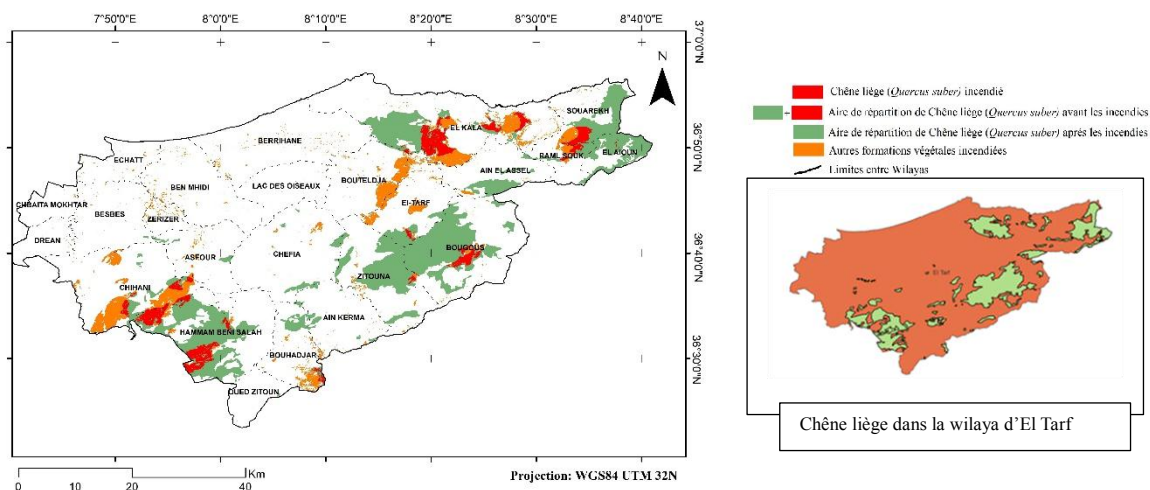
En ciblant la région d'El Kala, ce travail s'inscrit dans un contexte où les subéraies se trouvent au cœur d'enjeux de biodiversité, d'aménagement du territoire et de lutte contre la désertification. Les recommandations issues de cette étude permettront aux gestionnaires forestiers du Parc national d'El Kala et des services forestiers algériens :

- D'optimiser la prévention des feux dans les zones à potentiel de régénération naturel ;
- De cibler les reboisements dans les secteurs où la régénération naturelle est compromise ;
- De prioriser les aménagements sylvicoles post-incendie (élagage, lutte contre la végétation pionnière envahissante) pour favoriser le redressement des subéraies.

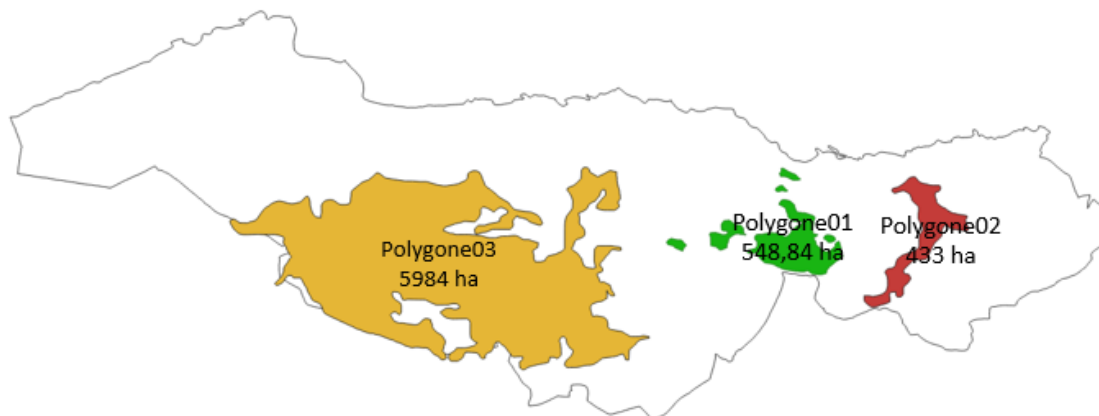
En définitive, l'objectif ultime est de préserver la pérennité des subéraies de *Quercus suber* en Algérie, en alliant les savoirs techniques de la télédétection, de l'écologie forestière et de la statistique multivariée pour apporter une réponse concrète à la problématique de résilience face aux feux. Cette étude fournira un cadre scientifique solide pour soutenir les stratégies de conservation et de restauration, indispensables dans un contexte méditerranéen où les incendies s'intensifient et où les écosystèmes forestiers subissent des pressions croissan

### 5.12. Le chêne liège de la wilaya d'El Tarf

La carte illustre l'impact des feux de forêts de l'année 2022 sur les subirais de la wilaya d'el Tarf



**Figure 11.** la répartition spatiale du chêne-liège au niveau de la wilaya d'El Tarf et incendie 2022



**Figure 12.** Représentation géographique détaillée de la répartition du chêne-liège dans la région d'El Kala

### 5.13. Les subéraies du Parc National d'El-Kala (PNEK)

#### 5.13.1. Caractéristiques et répartition du chêne liège

Le *Quercus suber* (chêne liège) constitue l'essence arborée prédominante du PNEK. Il se développe principalement sur les collines et les plaines, trouvant son optimum de croissance sur les grès et argiles numidiens. Sur le littoral, le chêne liège forme un faciès thermophile tandis qu'en altitude il évolue dans un faciès plus humide.

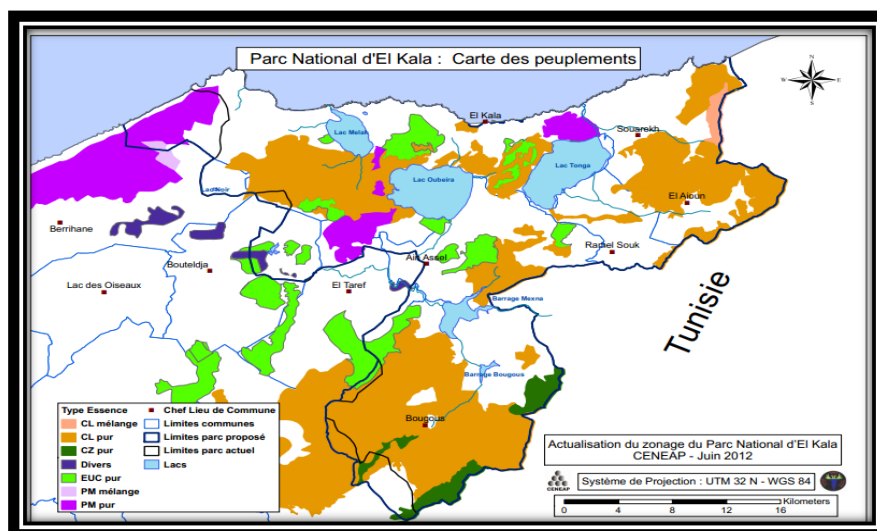


Figure 13. Carte des peuplements forestiers du Parc National d'El-Kala

#### 5.13.2.

#### Typologie des subéraies

#### Types de subéraies et leurs caractéristiques principales

Les subéraies du PNEK se répartissent en deux grands types :

On distingue plusieurs types de subéraies en fonction de leur localisation et de leur état de conservation.

- **Forêt d'altitude** : Il s'agit d'un peuplement de chêne-liège localisé en altitude, souvent mêlé occasionnellement à du *Quercus faginea* (chêne zeen). Cette subéraie se distingue par une structure forestière encore primitive, avec un sous-bois clairsemé et une absence quasi totale d'interventions humaines, notamment aucune coupe.

- **Forêt de plaine** : On y distingue deux sous-types selon le degré de dégradation :
  - **Subéraie non dégradée** : Ce type regroupe soit de petits massifs isolés, de quelques dizaines d'hectares, enclavés dans le maquis (comme la subéraie au nord de l'Oubéira), soit de grands peuplements continus comme ceux de Nehed ou Bougous.
  - **Subéraie dégradée** : Elle prend la forme d'un maquis, avec une strate arborée basse et un recouvrement végétal moyen, signe d'une dégradation avancée de la structure forestière d'origine.

### **Conclusion**

La présentation détaillée du Parc national d'El Kala met en évidence la richesse et la complexité de ses milieux naturels : du littoral aux massifs forestiers, en passant par les dunes et les zones humides. Les données géographiques, géologiques, pédologiques et climatiques démontrent comment se sont structurées les communautés végétales et animales. La mosaïque d'habitats disponibles, associée à une pression humaine croissante, rend cruciale la compréhension fine des caractéristiques du milieu, de ses enjeux de conservation et des interactions entre facteurs abiotiques et biotiques, qui seront au cœur des chapitres suivants.

5.13.3. Feu de forêt au niveau du PNEK

Tableau 9. Foyers et superficie incendiés du Chêne liège dans le Parc National d'El-Kala

Année Commune	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Totaux
El-Kala	00	00	20,5	00	03,53	01,4	24,5	23,22	00	0,02	02,5	10	01,5	00	00	87,17
El-Aioun	00	15	8,905	02	0,02	09,05	05,52	0,005	00	00	1,051	41,56	03,75	01	02	90,311
Ramel Souk	00	00	0,5	00	00	00	06	84,5	00	00	0,5	01,03	00	00	00	92,53
Souarekh	00	08	00	00	00	00	00	00	00	00	00	03,5	00	02	05	18,5
Ain Assel	00	23	00	00	01,5	00	0,5	05	00	0,03	134,5	00	00,32	00	00	164,85
Bougous	0,05	53	103,68	00	01	01,05	22,08	177,05	00	3,525	5,686	32,17	13,06	09,5	2,55	424,401
El-Tarf	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	10	00	68	78
Bouteldja	00	00	00	00	00	0,5	0,05	00	00	00	00	00	00	00	00	0,55
Berrihane	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
<b>Totaux</b>	0,05	99	133,585	02	06,05	12,45	58,65	289,775	00	3,575	144,237	88,26	28,63	12,5	77,55	<b>956,312</b>

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.) occupe une place éminente au sein des écosystèmes méditerranéens, tant pour ses fonctions écologiques que pour sa valeur socio-économique. Cette essence thermophile et héliophile se limite géographiquement au pourtour méditerranéen, incluant notamment la péninsule ibérique, le Maghreb et la côte orientale de l'Algérie (Boudy 1952 ; Quézel & Santa 1962). Les subéraies couvrant près de 2 000 000 ha à l'échelle mondiale comptent pour une part substantielle en Algérie, où leur superficie est estimée entre 375 000 ha et 450 000 ha. Cette répartition géographique restreinte s'explique par des exigences pédoclimatiques précises : le chêne-liège se développe sur des sols siliceux, depuis le niveau de la mer jusqu'à environ 1 550 m d'altitude, dans des zones où la température moyenne annuelle varie entre 13 °C et 18 °C, que les précipitations excèdent 600 mm par an et que l'humidité relative ne tombe pas en dessous de 60 % même au plus fort de la saison sèche (Belabbes 1996).

Dans ce contexte, la gestion durable des subéraies revêt une importance capitale. En effet, le substrat liégeux, isolant et imperméable, a historiquement permis une exploitation économique du liège pour la fabrication de bouteilles, de matériaux isolants et d'objets artisanaux, tout en assurant une forme de sylviculture extensible et respectueuse des sols (Zair 1989). Par ailleurs, les subéraies jouent un rôle crucial dans la préservation de la biodiversité méditerranéenne, hébergeant une faune et une flore adaptées à ces milieux semi-arides (Meddour & Sahar 2022). Elles contribuent également à la protection des sols contre l'érosion et à la régulation hydrologique en zones montagneuses et littorales (Ramade 1984).

Néanmoins, ces écosystèmes sont soumis à de nombreuses pressions, parmi lesquelles les incendies de forêt figurent en première ligne. Les changements climatiques prononcés dans la



## 6. Le chêne-liège (*Quercus suber* L.)

### 6.1. Origine, répartition et importance écologique

Le chêne-liège, *Quercus suber* L., est une espèce endémique de la région méditerranéenne occidentale, occupant une superficie globale estimée autour de 2 687 000 ha répartis sur sept pays (Afrique du Nord : Maroc 16,4 %, **Algérie 14 %**, Tunisie 5,3 % ; Europe du Sud : Portugal 32 %, Espagne 27 %, Italie 3,7 %, France 1,6 %) (Quézel & Santa, 1962 ; Boudy, 1950 ; Maire, 1961 ; Belabbes, 1996).



**Figure 14.** Répartition du Chêne liège dans le monde Direct Link

<https://planeteliège.com/tout-sur-le-liège/un-amateur-de-climats-doux> consulté le 08/06/2025

En Algérie, les subéraies couvrent approximativement 230 000 ha exploitables, dont la majeure partie se trouve dans la bande côtière orientale (wilayas de Béjaïa, Jijel, Skikda, Annaba et **El Tarf**) sur des sols essentiellement siliceux bénéficiant d'un climat subhumide à humide (Boudy, 1952 ; El Antary-Tazi et al., 2008 ; Yessad, 2000). Cette répartition nord-algérienne est renforcée par la présence d'îlots plus discontinus dans le Tell central (Chlef,

Tipaza, Boumerdès), à l'ouest (Oran), en altitude (Souk Ahras, Guelma, Constantine) et autour d'Alger (Blida, Bouira, Tizi Ouzou, Médéa, Tissemsilt) (Boudy, 1952).

Le chêne-liège joue un rôle structurant pour les écosystèmes dont il est l'essence dominante, particulièrement dans les subéraies d'Afrique du Nord. Il supporte une gamme variée d'espèces associées : bruyères arborescentes (*Erica arborea*), myrtes (*Myrtus communis*), genêts (*Genista* spp.), lentisques (*Pistacia lentiscus*), arbousiers (*Arbutus unedo*), cistes (*Cistus* spp.), ronces (*Rubus unedo*), oléastres (*Olea europaea*), ainsi qu'une myriade d'herbacées et d'arbustes (Zeraia, 1982 ; Quézel, 1976). Cet assemblage floristique, riche et diversifié, constitue un cortège où chaque espèce participe à la dynamique écologique et au maintien d'une résilience relative face aux perturbations (Camus, 1936–1938 ; Belabbes, 1996).

## 6.2. Biologie et dynamique de l'espèce

Botaniquement, *Q. suber* est un arbre à feuilles persistantes, souvent un peuplier plutôt trapu en peuplements ouverts (10–15 m, exceptionnellement 20–25 m en Afrique du Nord et au Portugal), au feuillage clair laissant pénétrer la lumière et au tronc épais et richement ramifié (Vignes, 1990). Sa longévité oscille entre 250–300 ans en l'absence d'exploitation corticière, mais chute à 150–200 ans lorsque la récolte du liège est régulière (Vignes, 1990). Le cycle reproductif débute vers 15 ans, avec une fructification abondante à partir de 30 ans ; les glands mûrissent à l'automne et leur chute se prolonge jusqu'à janvier (Vignes, 1990). Les semis sont peu nombreux et délicats, sensibles à l'ombre et aux conditions édaphiques, tandis que la régénération végétative (drageons) peut être importante après traumatismes (Cemagref, 1983).

**Tableau 10.** Caractéristique du chêne liège selon (Vignes, 1990).

Hauteur moyenne	10 à 15 mètres (généralement)
Hauteur exceptionnelle	20 à 25 mètres (exceptionnellement)
Forme de la cime	Irrégulière, s'étalant en longueur
Feuillage	Clair, permettant la pénétration de la lumière
Tronc (isolé)	Entouré de larges branches étalées
Tronc (en massif)	Plus droit et plus long
Longévité (non exploitée)	250 à 300 ans
Longévité (exploitée)	Environ 150 à 200 ans



**Figure 15.** Description botanique de *Quercus suber*

Sur le plan pédoclimatique, le chêne-liège est exigeant. Il préfère un régime pluvial annuel supérieur à 600 mm (jusqu'à 1200 mm en France), avec une humidité atmosphérique ne descendant pas en dessous de 60 % en saison sèche (Quézel, 1976 ; El Antary-Tazi et al., 2008). Thermophile, il tolère mal les gelées prolongées inférieures à  $-9^{\circ}\text{C}$  et s'adapte à des températures moyennes annuelles de  $13-18^{\circ}\text{C}$  (El Antary-Tazi et al., 2008). Du point de vue édaphique, il est strictement calcifuge : il se développe sur sols acides (sableux, graveleux, rocaillieux issus de roches siliceuses : grès numidiens, sables pliocènes, micaschistes, gneiss), mais ne supporte pas les substrats calcaires ou très argileux (Quézel, 1976). On le rencontre de la plaine (bord de mer) jusqu'à  $\sim 1550$  m d'altitude en Afrique du Nord, mais jamais au-delà de 700 m en France (Quézel & Santa, 1962 ; Belabbes, 1996).

Voici les exigences pédoclimatiques du *Quercus suber* selon les auteurs suivants : El Antary-Tazi et al. (2008) Boudy (1952, 1955) Cantat et al. (2005) Maire (1926) Zeraia (1981, 1982) Chollet (1997) Camus (1938) Abdelhamid (2010) Quézel et Santa (1962) Quezel (2000).

**Tableau 11.** Exigences pédoclimatiques du chêne liège

Température	Le <i>Quercus suber</i> est une espèce relativement thermophile préfère des températures douces, avec un optimum entre 13°C et 18°C. Il ne supporte pas les gelées prolongées de -9 °C.
Humidité	Le chêne-liège nécessite une humidité atmosphérique d'au moins 60%, même en saison sèche. Il exige des précipitations annuelles supérieures à 600 mm.
Lumière	Essentiellement héliophile, le chêne-liège supporte mal l'ombre. Son taux de survie et sa croissance sont significativement améliorés par un éclaircissement relatif élevé.
Altitude	Son aire de développement varie en fonction du relief, allant du niveau de la mer jusqu'à 1550 mètres en Algérie. Il prospère généralement entre 900 et 1000 mètres.
Exposition	À partir de 600 mètres d'altitude, le chêne-liège préfère les stations exposées au sud. Sur les versants nord, il est concurrencé par d'autres espèces.
Exigences Pédologiques	Le chêne-liège évite les sols argileux compacts, préférant les sols siliceux tels que les grès numidiens et les sables pliocènes.

La variabilité génétique du *Q. suber* est remarquable, en raison de son allogamie marquée. On observe de notables différences morphologiques entre écotypes et individus, notamment en ce qui concerne la qualité technologique du liège et sa vitesse de croissance (Vignes, 1990). Certains auteurs ont même décrit un « chêne occidental » (*Q. occidentalis* Gay) pour les peuplements du Sud-Ouest, se distinguant par des caractères de cupules et de maturation des glands (Vignes, 1990). Des hybridations avec d'autres chênes sont fréquentes : *Q. suber* × *Q. ilex* (*Q. morizii*) ou *Q. suber* × *Q. cerris* (*Q. crenata*) (Quézel & Santa, 1962).

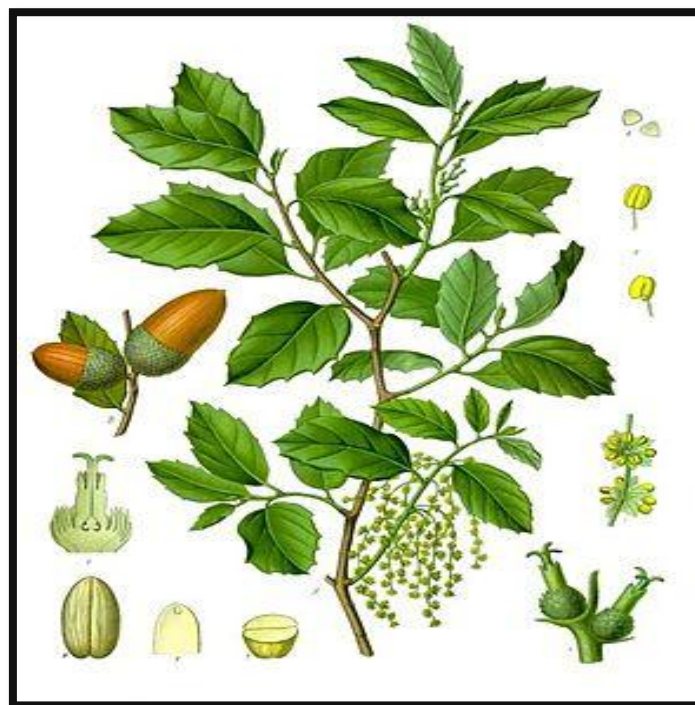
### 6.3. Biologie et dynamique de l'espèce

Botaniquement, *Q. suber* est un arbre à feuilles persistantes, souvent un peuplier plutôt trapu en peuplements ouverts (10–15 m, exceptionnellement 20–25 m en Afrique du Nord et au Portugal), au feuillage clair laissant pénétrer la lumière et au tronc épais et richement ramifié (Vignes, 1990). Sa longévité oscille entre 250–300 ans en l'absence d'exploitation corticière, mais chute à 150–200 ans lorsque la récolte du liège est régulière (Vignes, 1990). Le cycle reproductif débute vers 15 ans, avec une fructification abondante à partir de 30 ans ; les

glands mûrissent à l'automne et leur chute se prolonge jusqu'à janvier (Vignes, 1990). Les semis sont peu nombreux et délicats, sensibles à l'ombre et aux conditions édaphiques, tandis que la régénération végétative (drageons) peut être importante après traumatismes (Cemagref, 1983).

**Tableau 12.** Caractéristique du chêne liège selon (Vignes, 1990).

Hauteur moyenne	10 à 15 mètres (généralement)
Hauteur exceptionnelle	20 à 25 mètres (exceptionnellement)
Forme de la cime	Irrégulière, s'étalant en longueur
Feuillage	Clair, permettant la pénétration de la lumière
Tronc (isolé)	Entouré de larges branches étalées
Tronc (en massif)	Plus droit et plus long
Longévité (non exploitée)	250 à 300 ans
Longévité (exploitée)	Environ 150 à 200 ans



**Figure 16.** Description botanique de *Quercus suber*

Sur le plan pédoclimatique, le chêne-liège est exigeant. Il préfère un régime pluvial annuel supérieur à 600 mm (jusqu'à 1200 mm en France), avec une humidité atmosphérique ne descendant pas en dessous de 60 % en saison sèche (Quézel, 1976 ; El Antary-Tazi et al.,

2008). Thermophile, il tolère mal les gelées prolongées inférieures à  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  et s'adapte à des températures moyennes annuelles de  $13\text{--}18\text{ }^{\circ}\text{C}$  (El Antary-Tazi et al., 2008). Du point de vue édaphique, il est strictement calcifuge : il se développe sur sols acides (sableux, graveleux, rocaillieux issus de roches siliceuses : grès numidiens, sables pliocènes, micaschistes, gneiss), mais ne supporte pas les substrats calcaires ou très argileux (Quézel, 1976). On le rencontre de la plaine (bord de mer) jusqu'à  $\sim 1550\text{ m}$  d'altitude en Afrique du Nord, mais jamais au-delà de  $700\text{ m}$  en France (Quézel & Santa, 1962 ; Belabbes, 1996).

Voici les exigences pédoclimatiques du *Quercus suber* selon les auteurs suivants : El Antary-Tazi et al. (2008) Boudy (1952, 1955) Cantat et al. (2005) Maire (1926) Zeraia (1981, 1982) Chollet (1997) Camus (1938) Abdelhamid (2010) Quézel et Santa (1962) Quézel (2000).

**Tableau 13.** Exigences pédoclimatiques du chêne liège

Température	Le <i>Quercus suber</i> est une espèce relativement thermophile préfère des températures douces, avec un optimum entre $13^{\circ}\text{C}$ et $18^{\circ}\text{C}$ . Il ne supporte pas les gelées prolongées de $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
Humidité	Le chêne-liège nécessite une humidité atmosphérique d'au moins 60%, même en saison sèche. Il exige des précipitations annuelles supérieures à 600 mm.
Lumière	Essentiellement héliophile, le chêne-liège supporte mal l'ombre. Son taux de survie et sa croissance sont significativement améliorés par un éclairage relatif élevé.
Altitude	Son aire de développement varie en fonction du relief, allant du niveau de la mer jusqu'à 1550 mètres en Algérie. Il prospère généralement entre 900 et 1000 mètres.
Exposition	À partir de 600 mètres d'altitude, le chêne-liège préfère les stations exposées au sud. Sur les versants nord, il est concurrencé par d'autres espèces.
Exigences Pédologiques	Le chêne-liège évite les sols argileux compacts, préférant les sols siliceux tels que les grès numidiens et les sables pliocènes.

La variabilité génétique du *Q. suber* est remarquable, en raison de son allogamie marquée. On observe de notables différences morphologiques entre écotypes et individus, notamment en ce qui concerne la qualité technologique du liège et sa vitesse de croissance (Vignes, 1990). Certains auteurs ont même décrit un « chêne occidental » (*Q. occidentalis* Gay) pour les peuplements du Sud-Ouest, se distinguant par des caractères de cupules et de maturation

des glands (Vignes, 1990). Des hybridations avec d'autres chênes sont fréquentes : *Q. suber* × *Q. ilex* (*Q. morizii*) ou *Q. suber* × *Q. cerris* (*Q. crenata*) (Quézel & Santa, 1962).

#### 6.4. Structure, classification et peuplements porteurs de semences (PPG)

La structure d'une forêt de chêne-liège s'analyse à travers ses peuplements : il existe en Algérie 61 Peuplements Porte-Graines (PPG) sur 2 514,5 ha, faisant du *Q. suber* l'espèce la plus représentée dans ce dispositif, suivi du chêne vert (*Q. ilex*) sur 778 ha, puis de chênes zeen (*Q. canariensis*) sur 274 ha (Belabbes, 1996). Les PPG sont des peuplements adultes, naturels ou artificiels, sélectionnés pour la production de graines de qualité : critères de classification : homogénéité, isolement (100–300 m), vitalité, âge moyen, forme régulière, état sanitaire, cimes fournies, caractère du bois analysé en laboratoire (Belabbes, 1996).

**Tableau 14.** Peuplements porte graines en Algérie

Espèce			Nombre sp	Nombre PPG	Superficie (Ha)
Code sp	Noms communs	Noms scientifiques			
15	Chêne liège	<i>Quercus suber</i>	1	61	2514,5
16	Chêne vert	<i>Quercus ilex</i>	1	19	778
17	Chêne zeen	<i>Quercus canariensis</i>	1	10	274
18	Peuplier blanc	<i>Populus alba</i>	1	11	123
19	Peuplier noir	<i>Populus nigra</i>	1	1	50 sujets
20	Peuplier de l'Euphrate	<i>Populus euphratica</i>	1	3	2ha / 80 sujets
21	Peuplier tremble	<i>Populus tremula</i>	1	1	2
22	Aulne glutineux	<i>Alnus glutinosa</i>	1	6	264
23	Eucalyptus	<i>E. astreingens/E. camaldulensis....</i>	22	32	707
24	Frêne	<i>Fraxinus</i>	1	4	28
25	Pistachier de l'Atlas	<i>Pistacia atlantica</i>	1	41	3990 sujets
26	Noyer	<i>Juglans regia</i>	1	31	–
27	Arganier	<i>Argania spinosa</i>	1	1	204
28	Acacia	<i>a-Faidherbia albida/ b- Acacia arabica....</i>	7	24	–
29	Tamaris	<i>Tamarix aphylla</i>	–	–	–
30	Olivier de l'apperine	<i>Olea lapperrinei</i>	1	4	–
31	Ficus	<i>a-Ficus ingens/b-Ficus</i>	–	–	–

		<i>salicifolia</i>			
32	Taghart	<i>Maerua crassifolia</i>	1	1	–
33	Sioak-Téhok	<i>Salvadora persica</i>	1	2	–
34	Dattier du désert	<i>Balanites aegyptiaca</i>	1	9	–
35	Calotropis	<i>Calotropis procera</i>		0	–
36	Merisier	<i>Prunus avium</i>	1	1	04 sujets
Total Feuillus			46	262	4896,5 ha/ 4124 S

### 6.5. Exploitation, enjeux économiques et dégradation

Le liège, extrait de l'écorce ("démasclage"), se forme sous l'écorce primaire quand l'arbre atteint 50–70 cm de circonférence. Le liège mâle (première formation) est de faible qualité, tandis que le liège femelle (de production) atteint une épaisseur commercialisable (30 mm) au bout d'une douzaine d'années, puis se prélève tous les 9–15 ans (Vignes, 1990). Dans la wilaya d'El Tarf, le chêne croît sur 63 765 ha (36,7 % de la surface forestière), dont 43 000 ha à l'intérieur du Parc national d'El Kala, et la production moyenne annuelle se situe à ~9500 qx (15 000 qx en 1998), avec un rendement moyen de 2,10 qx/ha/an (Benseghir, 1995). Malgré un potentiel important, la subéraie algérienne reste sous-exploitable du fait de pratiques sylvicoles inadéquates, d'un pâturage anarchique, de levées du liège mal maîtrisées (blessures, récoltes incomplètes) et d'une absence de régénération suffisante (Belabbes, 1996).



**Figure 17.** Tronc de Chêne après la levée de liège



**Figure 18.** Liège après l'opération de Démasclage

### 6.6. Facteurs de dégradation des peuplements :

Le vieillissement des peuplements forestiers constitue un enjeu majeur, puisque plus de 60 % d'entre eux ont dépassé l'âge de 120 ans. Dans ces conditions, le rythme naturel de dix ans entre deux levées n'est plus adapté pour obtenir une épaisseur de bois marchande satisfaisante (Benseghir, 1995).

Les incendies de forêt, qu'ils soient volontaires ou accidentels, détruisent la couverture végétale et interrompent le cycle de production forestière. Cette destruction retarde fortement la régénération naturelle des peuplements et compromet la pérennité des forêts concernées (Haou, 1995).

Le surpâturage par le bétail domestique empêche la levée des semis naturels et cause des dommages aux jeunes drageons. Ces pressions pastorales limitent la capacité des forêts à se renouveler et modifient la dynamique des communautés végétales.

L'enrésinement non contrôlé — par l'introduction de conifères tels que le pin d'Alep, le pin maritime ou le pin pignon — entraîne un appauvrissement de la biodiversité autochtone et crée une compétition accrue pour les ressources en eau (Sommaire PN El Kala).

L'exploitation du liège, lorsqu'elle est réalisée avec de mauvaises pratiques, provoque des blessures sur les arbres, favorise la pourriture et augmente la vulnérabilité aux attaques parasitaires par *Armillaria mellea*, *Hypoxylon mediterraneum*, *Phytophthora cinnamomi* ou *Diplodia mutila* (Vignes, 1990 ; Belabbes, 1996).

Enfin, les peuplements sont également affectés par divers ravageurs entomologiques, notamment *Lymantria dispar*, *Coraebus florentinus*, *Cerambyx cerdo*, *Crematogaster scutellaris*, *Platype cylindrus* et *Tortrix viridana*, qui participent à la dégradation des arbres et à la réduction de leur vitalité (Belabbes, 1996).

### 6.7. Typologie des subéraies et conservation

Dans le Parc national d'El Kala, les subéraies se distinguent en deux grands types écosystémiques. Les forêts d'altitude représentent des peuplements subéraiers primitifs, parfois mêlés à *Quercus faginea* (chêne zeen), et se caractérisent par un sous-bois clairsemé et un état naturel quasi intact (Boudy, 1952 ; Yessad, 2000). En contraste, les forêts de plaine

offrent une mosaïque de situations : d'une part, on trouve des subéraies non dégradées, sous la forme de petits massifs isolés de quelques dizaines d'hectares (par exemple la subéraie au nord de l'Oubéira) ou de vastes peuplements continus tels que Nehed et Bougous ; d'autre part, les subéraies dégradées se traduisent par la formation de maquis, une strate arborée basse et un recouvrement végétal considérablement réduit (Boudy, 1952 ; Yessad, 2000).

Pour restaurer ces formations forestières, plusieurs actions sont nécessaires. Il convient tout d'abord de réviser les plans de gestion forestière afin d'y intégrer des objectifs de reconquête et de maintien de la subéraie. Le renforcement des capacités de production de plants en pépinière permettra de disposer de matériel végétal adapté pour la régénération assistée. Les travaux de terrain comprennent la régénération assistée, le semis de glands, les opérations de reboisement ainsi que les chantiers de débroussaillage et de dessouchement, destinés à éliminer les souches et à préparer le sol à l'implantation de jeunes arbres (Sommaire PN El Kala).

### **6.8.Perspectives de gestion durable**

Plusieurs axes d'intervention sont essentiels pour assurer la pérennité du chêne-liège en Algérie. Tout d'abord, il convient d'adopter des pratiques sylvicoles adaptées, en commençant par la sélection rigoureuse des peuplements producteurs de qualité (PPG). Une éclaircie progressive permettra de favoriser le semis naturel, tandis que la maîtrise du pâturage évitera la dégradation des jeunes plants. Par ailleurs, une lutte ciblée contre les maladies et ravageurs—par ultrasons ou traitements biologiques—et l'amélioration des techniques de levée du liège contribueront à accroître la productivité et la santé des arbres (Benseghir, 1995).

La protection contre les incendies constitue un autre volet majeur. L'aménagement de pare-feu bien dimensionnés et une surveillance renforcée durant la période critique de juillet à septembre sont indispensables pour prévenir les départs de feu. En complément, des campagnes de sensibilisation auprès des communautés locales permettront de réduire les feux volontaires ou accidentels (Haou, 1995 ; Conservation des forêts de la wilaya d'El Tarf, 1997).

Le reboisement et la régénération assistée doivent reposer sur des semences d'origine locale, afin de préserver l'adaptation génétique des populations. La création et la gestion

rigoureuse de pépinières garantiront un matériel sanitaire de qualité : les plants seront élevés en pépinière puis transférés en pleine terre. Après des coupes sélectives, l'encouragement du drageonnement contrôlé optimisera le renouvellement naturel du peuplement (Cemagref, 1983 ; Zair, 1989).

Un suivi écologique à long terme est enfin nécessaire pour mesurer l'efficacité de ces actions. Il s'agit notamment de mettre en place un monitoring de l'état sanitaire des peuplements, de recenser les PPG, de réaliser une cartographie précise de la répartition du chêne-liège et de suivre la régénération après chaque sinistre (Haou, 1995 ; Belabbes, 1996).

Enfin, la recherche et l'innovation doivent être encouragées. Des études approfondies sur la variabilité génétique et l'adaptation au changement climatique permettront de sélectionner des provenances performantes. Parallèlement, la valorisation des produits non ligneux (miel, plantes aromatiques) et le développement du tourisme vert offriront des débouchés économiques complémentaires, renforçant ainsi l'intérêt des communautés pour la conservation du chêne-liège (Zeraia, 1982 ; El Antary-Tazi et al., 2008)



## 7. Conclusion

Le chêne-liège (*Quercus suber*) est un maillon essentiel des écosystèmes méditerranéens, fondamental pour la préservation de la biodiversité, la stabilisation des sols et des ressources hydriques, ainsi que pour l'économie locale à travers la production de liège. Les subéraies algériennes, en particulier dans la région d'El Kala (wilaya d'El Tarf), sont aujourd'hui exposées à des incendies de plus en plus fréquents et intenses, sous l'effet conjugué du changement climatique et de l'activité anthropique. L'incendie majeur d'août 2022 révèle l'urgence d'étudier la résilience post-incendie de ces peuplements pour définir des actions de gestion adaptées.

Cette thèse s'est donnée pour mission de combler plusieurs lacunes identifiées. D'une part, il manquait une quantification précise du seuil de sévérité des feux (NBR) au-delà duquel la régénération naturelle du chêne-liège (rejets et semis) est compromise. D'autre part, les connaissances restaient insuffisantes sur l'influence conjointe des gradients écologiques locaux (altitude, exposition, pente, indice d'humidité topographique) sur la dynamique post-incendie. Enfin, il était nécessaire de coupler l'analyse spatiale via télédétection (indices NDVI, NDII, NBR) avec des relevés forestiers détaillés afin de distinguer les contributions respectives des rejets de souche et des semis naturels.

Les travaux menés ont combiné des analyses satellitaires (MODIS, Landsat, Sentinel-2), de la modélisation statistique (régression segmentée NBR–NDVI, RDA, GLM) et des observations terrain (inventaires post-incendie, proportions de rejets vs semis). Grâce à ces approches, il a été possible de définir un seuil critique de sévérité ( $NBR = -0,5956$ ) au-delà duquel la régénération naturelle est fortement compromise. En cartographiant les trajectoires post-incendie selon les classes de sévérité, nous avons démontré l'hétérogénéité spatiale de la reprise végétale. Par ailleurs, l'altitude, l'exposition, la pente et l'indice d'humidité topographique (TWI) sont apparus comme des facteurs déterminants dans la survie des rejets et l'efficacité des semis.

Ces résultats fournissent un socle scientifique pour orienter la gestion forestière et la restauration des subéraies post-incendie. Les recommandations opérationnelles proposées sont les suivantes :

## Conclusion

- Mettre en place des dispositifs préventifs (pare-feux, débroussailllements ciblés) dans les zones à sévérité modérée ( $NBR \approx -0,4$  à  $-0,6$ ), où la régénération naturelle par rejets reste viable.
- Intervenir par reboisement dans les zones aux feux très sévères ( $NBR < -0,5956$ ), en privilégiant des plants locaux issus de provenances adaptées aux conditions édaptiques (Zair 1989 ; Zeraïa 1982).
- Assurer une gestion sylvicole post-incendie dans les secteurs où la régénération naturelle apparaît, en élaguant les troncs morts et en luttant contre les broussailles envahissantes pour réduire la compétition hydrique et lumineuse.
- Mettre en place un suivi à long terme, mêlant télédétection et parcelles permanentes, afin d'anticiper les transitions successional et d'adapter les pratiques selon les évolutions climatiques et les régimes de feu (Tian et al. 2023).
- Impliquer les communautés locales dans la collecte de graines, la plantation et la surveillance des feux, pour renforcer la responsabilité partagée et réduire les risques de départs de feu accidentels (Arfa et al. 2019).

En synthèse, cette thèse établit un cadre opérationnel pour préserver la résilience des subéraies de chêne-liège en Algérie. Elle démontre que le seuil critique de sévérité des incendies ( $NBR = -0,5956$ ) est un indicateur clé pour différencier les zones à forte capacité de régénération naturelle de celles nécessitant une intervention humaine. Elle confirme également l'importance des facteurs écologiques locaux — altitude, exposition, humidité — dans la dynamique post-feu. Enfin, elle souligne le rôle crucial de l'approche intégrée (télédétection, statistiques multivariées, relevés terrain) pour fournir des recommandations concrètes aux gestionnaires forestiers, afin d'assurer la pérennité et la restauration des subéraies face à un climat et des régimes de feu de plus en plus instables.

## 8. Références bibliographiques

1. **Abdelhamid K., 2010.** le chêne-liège. Programme pour l’Afrique du nord, projet éducation et conservation de la biodiversité. Association Tunisienne Pour la Protection de la Nature et de l’Environnement. 49T, 4p.
2. **Abed, S. S., & Selmane, A. N. E. I., 2023.** Spatiotemporal projections of extreme temperatures over Algeria using CMIP6-MME global climate models outputs.
3. **Arfa, A. M. T., Benderradji, M. E. H., Saint-Gérand, T., & Alatou, D., 2019.** Cartographie du risque feu de forêt dans le Nord-Est algérien : cas de la wilaya d’El Tarf. *Cybergeo: European Journal of Geography*, .....n et v.
4. **Aronson, J., et al., 2012.** Effects of fire on soil properties and nutrient cycling. *Journal of Mediterranean Ecology*, 9(1), 45–58.
5. **Belabbes, D., 1996.** Le chêne-liège. *La Forêt Algérienne*, (1), 26–30.
6. **Belabbes, M., 1996.** *Dynamique des peuplements porte-graines, qualité des semences et régénération du chêne-liège (Quercus suber L.) en Algérie*, Thèse de Doctorat, Université d’Annaba.
7. **Belhadj, G., 1996.** *Contribution à la cartographie des ornithocénoses en Algérie : Atlas de l’avifaune nicheuse du Parc National d’El-Kala*. Thèse de Magister, Institut National Agronomique d’El Harrach). 200 p.
8. **Benhalima, Y., El Habib, F. M., & Dehane, B., 2023.** Study of the resilience parameters of cork oak after fire in north-western Algeria. *International Journal of Environmental Studies*, 80(6), 1875–1887.
9. **Benseghir, L. A., 1995.** *Amélioration des techniques de production hors-sol du chêne-liège : conteneurs, substrats, nutrition minérale*. Mémoire de Master en Sciences Forestières, CEMAGREF, Aix-en-Provence. 28 p.
10. **Benslama, M., 1993.** *Contribution à l’étude de la couverture écopédologique et du rôle de la matière organique*. Thèse de Magister, Institut National Agronomique d’El Harrach. 183 p.
11. **Benyacoub, S., 1993.** *Écologie de l’avifaune forestière nicheuse de la région d’El-Kala*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne. 285 p.
12. **Bouazzaoui, A., Bouhraoua, R. T., & Ghefar, M., 2021.** Factors affecting post-fire vitality and recovery of cork oak trees in Yfri Forest (North-West of Algeria). *Lebanese Science Journal*, 22(2), 148.
13. **Bouazzaoui, A., et al. (2021).** Impacts écologiques des incendies de forêt sur la végétation méditerranéenne : cas du chêne-liège en Algérie. *Ecologia Mediterranea*, 47(4), 15–32.
14. **Boudy, P., 1950a.** *Économie forestière nord-africaine : monographie et traitement des essences*. Larose, Paris. 172–180.
15. **Boudy, P., 1950b.** Inventaire et cartographie des subéraies de la région méditerranéenne. *Revue Forestière*, 12(3), 123–138.
16. **Boudy, P., 1952a.** *Guide du forestier en Afrique du Nord*. Maison Rustique, Paris. 509 p.

17. **Boudy, P., 1952b.** La situation du chêne-liège en Algérie. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle d'Afrique du Nord*, 43(2), 201–216.
18. Boudy, P., 1955. *Économie forestière nord-africaine : t. 4, Description forestière de l'Algérie*. [Éditeur non précisé].
19. **Bouhraoua, R. T., Piazzetta, R., & Berriah, A., 2014.** Les reboisements en chêne-liège en Algérie, entre contraintes écologiques et exigences techniques. *Forêt Méditerranéenne*, 35(2), 171–176.
20. **Bouhraoua, T., et al., 2014.** Les incendies de forêt dans le Nord-Est algérien : analyse des causes, fréquence et impacts à Kala. *Journal Algérien d'Aménagement du Territoire*, 3(2), 55–72.
21. **Bouregbi-I, F., 2014a.** Impacts socio-économiques des feux de forêt en Algérie. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 6(1), 7–21.
22. **Bouregbi-I, F., 2014b.** *Causes et conséquences des feux de forêts sur la production du liège dans les subéraies du Nord : essai de valorisation et réhabilitation*. Diplôme de Magister en Écologie et Environnement. 192 p. <https://bu.umc.edu.dz/theses/biologie/BOU6648.pdf>.
23. **Camus, A., 1938.** *Les chênes : monographie du genre Quercus (tome I, sections Cerris et Mesobalanus)*. Paul Lechevalier, Paris. 686 p.
24. **Cantat R., Piazzetta R., 2005.** La levée de liège. Institut méditerranéen de liège
25. **Cemagref., 1983a.** *Expérimentations de régénération assistée du chêne-liège en subéraies algériennes* (Rapport Technique).
26. **Cemagref., 1983b.** *Régénération artificielle des chênes* (Note Technique n° 50).
27. **Ceneap., 2011.** *Plan de gestion du Parc National d'El-Kala* (Rapport interne).
28. **Chalabi, B., 1990.** *Contribution à l'étude de l'importance des zones humides algériennes pour la protection de l'avifaune : cas du lac Tonga (Parc National d'El-Kala)*. Thèse de Magister, Institut National Agronomique d'El Harrach. 131 p.
29. **Chergui, A., et al., 2018a.** Influence du changement climatique sur la fréquence des incendies de forêt en Méditerranée. *Climatologie et Ressources Naturelles*, 22(1), 89–102.
30. **Chergui, B., Fahd, S., & Santos, X., 2018b.** *Quercus suber* forest and *Pinus* plantations show different post-fire resilience in Mediterranean north-western Africa. *Annals of Forest Science*, 75, 1–11.
31. **Chollet F., 1997.** La régénération naturelle du Hêtre. ONF- Bulletin techniques n° 32
32. **Chuvienco, E., 2003a.** *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Springer, Dordrecht.
33. **Chuvienco, E., 2003b.** *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping : The Role of Remote Sensing Data* (Vol. 4). World Scientific.
34. **Colin, F. & Jappiot, M., 2001a.** *Feux de forêt et milieux méditerranéens*. Éditions TEC & DOC, Lavoisier.
35. **Colin, P.-Y., & Jappiot, M., 2001b.** *Protection des forêts contre l'incendie : fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen* (Vol. 36). FAO.
36. *Conservation des forêts de la wilaya d'El Tarf.* (1997). *Bilan de la campagne des incendies de forêts : Conservation des forêts de la wilaya d'El Tarf.*

37. **De Belair, G., 1990.** *Structure, fonctionnement et perspectives de gestion de quatre écocomplexes lacustres et marécageux (El-Kala, Est algérien)*. Thèse de Doctorat de spécialité, Université Sciences et Techniques de Languedoc, Montpellier. 193 p.
38. **Dimopoulos, P., et al., 2006.** Spectral signatures of Mediterranean oak woodlands: implications for remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 27(23), 5398–5412.
39. **Dupuy, J. L., Boivin, T., Duché, Y., Martin-Stpaul, N., Pimont, F., & Rigolot, E., 2015b.** Impact du changement climatique sur les risques en forêt : le cas de l'incendie et de ses interactions avec la sécheresse et les pullulations d'insectes. *Innovations Agronomiques*, 47, 29–50.
40. **Dupuy, J. L., et al., 2015a.** Changes in fire regimes and potential effects on Mediterranean ecosystems : case studies. *Journal of Mediterranean Ecology*, 35(3), 123–137.
41. **El Antary Tazi, R., et al., 2008.** Écologie, répartition et gestion du chêne-liège (*Quercus suber*) en Algérie. *Bulletin du Muséum National d'Histoire Naturelle*, 20, 45–63.
42. **El Antary Tazi, S., Abourouh, M., & Afia, A., 2008.** État des connaissances scientifiques sur les subéraies : bilan et perspectives. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, XL(39), 9–18.
43. **El Habib, F. M. & Dehane, B., 2024.** The annual growth of cork in the face of climate variations (Northwest of Algeria). *International Journal of Environmental Studies*, 81(2), 781–794.
44. **Flannigan, M. D. & Vonder Haar, D., 1986b.** The influence of weather on wildfire behaviour. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38(3–4), 229–240.
45. **Flannigan, M. D., & Vonder Haar, T. H., 1986a.** Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Canadian Journal of Forest Research*, 16, 975–982.
46. **Gill, A. M., 1975.** Fire and the Australian flora: a review. *Australian Forestry*, 38(1), 4–25. <https://doi.org/10.1080/00049158.1975.10675618>.
47. **Goldammer, J. G., 2007a.** Vegetation fires and the Earth system : Trends and needs for action. *HEAPS Newsletter*, 3, 21–22.
48. **Goldammer, J. G., 2007b.** *Wildland Fire Management Handbook for Sub-Saharan Africa*. ProForest, Oxford.
49. **Gonzalez-Alonso, F., Merino-de-Miguel, S., Garcia-Gigorro, S., Roldan-Zamarron, A., Cueva, J. M., & Arino, O., 2004.** Using Landsat 7 ETM+ imagery for post-fire recovery assessment : the roles of spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 25(21), 4477–4490.
50. **Gonzalez-Alonzo, F., Merino-de-Miguel, S., Garcia-Gigorro, S., Roldan-Zamarron, A., Cueva, J. M., & Arino, O., 2004.** Mapping forest fire damage with Envisat. *ESA Bulletin*, 120, 23–26.
51. **Guillaume, J. H. A., et al., 2017.** Integration of optical and SAR data for wildfire monitoring in tropical regions. *Remote Sensing of Environment*, 189, 156–168.
52. **Habib, S., & Dehane, A., 2024.** Tendances récentes des feux de forêt en Algérie et rôles climatiques. *Journal Algérien du Climat et de l'Environnement*, 12(1), 23–39.

53. **Haou, S., 1995.** Dynamique de la végétation des subéraies après incendie dans la région d'El Kala. Mémoire Ingénieur, Université d'Annaba. 38 p.
54. **Haou, S., 1999.** *Étude synchronique post-incendie de la végétation des subéraies de la Numidie orientale.* Thèse de Magister, Institut Saint-Nicolas, Université d'Annaba. 70 p.
55. **Jean-Pierre, L., Philippe, G., Mohamed, A., Abdelmatif, D., & Larbi, B., 2010.** Climate evolution and possible effects on surface water resources of North Algeria. *Current Science*, 1056–1062.
56. **Joleaud, L., 1936.** *Étude géologique de la région de Bône et la Calle.* Bulletin du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, 2e série, Strat., n° 12, 185 p.
57. **Khoualdia, W., Djebbar, Y., & Hammar, Y., 2014.** Caractérisation de la variabilité climatique : cas du bassin versant de la Medjerda (Nord-Est algérien). *Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie*, 29, 6–23.
58. **Lee, C., et al., 2020.** Deep learning for cork oak forest mapping : Sentinel-2 and LiDAR synergy. *Ecological Informatics*, 56, 101039.
59. **Lei Tian, Y., et al., 2023.** Advances in remote sensing applications for wildfire mapping and monitoring : a review. *Remote Sensing*, 15(5), 1214.
60. **Maire, R., 1961.** *La flore de l'Afrique du Nord* (Vol. 7). Paul Lechevalier, Paris. 329 p.
61. **Meddour, R., & Sahar, O., 2022.** Floristic diversity of *Quercus suber* woodlands in Kabylia (north-eastern Algeria) : checklist and brief analysis. *Botanica Complutensis*, 46.
62. **Ouahad-Benkheira, H., 2019.** Facteurs biophysiques déterminant l'inflammabilité en forêts méditerranéennes : cas du chêne-liège. *Revue Forestière Algérienne*, 9(2), 77–94.
63. **Pausas, J. G., & Keeley, J. E., 2014a.** Abrupt climate-independent fire regime changes. *Ecosystems*, 17(6), 1109–1120.
64. **Pausas, J. G., & Keeley, J. E., 2014b.** Evolutionary ecology of resprouting and seeding in fire-prone ecosystems. *New Phytologist*, 204(1), 55–65.
65. **PNEK (Parc National d'El-Kala), 2011.** *Plan de gestion du Parc National d'El-Kala.* Ministère de l'Agriculture, Direction Générale des Forêts.
66. **PNEK., 1984.** *Parc National d'El-Kala, phase II : recensement et analyse des potentialités du milieu naturel et humain.* Bureau National des Études Forestières, Blida. 176 p.
67. **PNEK., 1998.** *Projet Plan de Gestion PNEK.* Landxape Aménagement Co., Skikda. 200 p.
68. **PNEK., 2007.** *Données météorologiques sur 10 ans (1996–2007) de la région d'El-Kala.* Station météorologique d'El-Kala. 30 p.
69. **Quezel, P., 2000.** *Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen.* Ibis Press, Paris. 117 p.
70. **Quezel, P., & Santa, S., 1962.** *Nouvelle flore d'Algérie et des régions désertiques méridionales : tome I.* CNRS, Paris. 565 p.
71. **Quezel, P., & Santa, S., 1963.** *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales : vols. I–II.* N.R.S., Paris. 1170 p.

72. **Ramade, F., 1984.** *Éléments d'écologie fondamentale*. McGraw-Hill, Paris. 397 p.
73. **Ramirez-Ferrer, M., et al., 2017.** Spectral characterization of cork oak forests using Sentinel-2 data. *Forests*, 8(12), 492.
74. **Rouag, R., 1999.** *Inventaire et écologie des peuplements herpétologiques du Parc National d'El-Kala (Nord-Est algérien, Kala)* (Thèse de Magister, Université d'Annaba). 79 p.
75. Sommaire PN El Kala. (s. d.). *Sommaire sur le chêne-liège et problématiques de conservation dans le Parc National d'El Kala* (Document interne).
76. **Telailia, S., 2002.** *Contribution à l'étude écologique de l'avifaune nicheuse dans les différentes formations de la forêt de chêne-liège (Quercus suber L.) post-incendiée de la région d'El-Kala (Parc National d'El-Kala)*. Thèse de Magister, Institut National Agronomique d'El Harrach. 145 p.
77. **Tian, L., Wu, X., Tao, Y., Li, M., Qian, C., Liao, L., & Fu, W., 2023.** Review of remote sensing-based methods for forest aboveground biomass estimation : Progress, challenges, and prospects. *Forests*, 14(6), 1086.
78. **Trabaud, L., 1985a.** Aspect floristique de la recolonisation des garrigues de *Quercus coccifera* et des forêts de *Pinus halepensis* après incendie in Bas Languedoc (Sud de la France). *Jornadas sobre bases ecológicas per la gestió ambiental*, Montesqui (Ripollès), 13–16 pp.
79. **Trabaud, L., 1985b.** *Dynamique des régimes de feux en Méditerranée*. Éditions IRD, Paris.
80. **Vignes, V., 1990.** Biologie et écologie du chêne-liège. *Bulletin Forêt Méditerranéenne*, 4(1), 7–16.
81. **Yessad, A., 2000.** *Caractéristiques écologiques des subéraies d'Algérie*. Thèse de Doctorat, Université d'Alger.
82. **Yessad, S. A., & André, P., 2000.** *Le chêne-liège et le liège dans les pays de la Méditerranée occidentale*. ASBL Forêt Wallonne. 190 p.
83. **Zair, M., 1989a.** *Influence des méthodes de plantation et d'élevage en pépinière sur la reprise des plants de chêne-liège (Quercus suber L.)*. Thèse, Institut National Agronomique d'El Harrach, Département de Foresterie, Alger). 50 p.
84. **Zair, M., 1989b.** Reboisement avec des plants de subéraie en Algérie : méthodes et perspectives. *Revue des Sylvicultures Méditerranéennes*, 12(3), 35–42.
85. **Zammit, O., 2008.** *Détection de zones brûlées après un feu de forêt à partir d'une seule image satellitaire SPOT 5 par techniques SVM*. Thèse Doctorale, Université Nice Sophia Antipolis.
86. **Zammit, R., 2008.** *Feux de forêt en zone méditerranéenne : aspects physico-chimiques et gestion*. Éditions Tec & Doc, Lavoisier.
87. **Zeraia, L., 1981.** *Essai d'interprétation comparative des données écologiques, phénologiques et de production subéro-lignioleuse dans les forêts de chêne-liège de Provence Cristalline (France méridionale) et d'Algérie* (Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille). 367 p.
88. **Zeraia, L., 1982.** *Essai d'interprétation comparée des données écologiques et subéro-lignioleuses en Provence et en Algérie*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Saint-Jérôme, Marseille. 188 p.

89. Zeraïa, L., 1982. *Le chêne-liège : phytosociologie, édaphologie, régénération et productivité*. Institut National de la Recherche Forestière, Alger. 159 p.

### Résumé

L'analyse temporelle du NDVI entre septembre 2022 et mars 2024 confirme une reprise graduelle du couvert végétal dans les zones modérément touchées, avec des valeurs positives de NDVI à partir de mars 2024, témoignant d'une régénération mixte. À l'inverse, dans les zones les plus affectées, les valeurs de NDVI restent faibles, signalant soit un retard marqué dans la dynamique de régénération, soit une transition vers des communautés végétales plus pionnières ou héliophiles, telles que des formations herbacées ou broussailleuses.

### المخلص

يؤكد التحليل الزمني لمؤشر الغطاء النباتي الموحد بين سبتمبر 2022 ومارس 2024 التعافي التدريجي للغطاء النباتي في المناطق المتضررة بشكل معتدل، مع قيم مؤشر الغطاء النباتي الموحد الإيجابية اعتباراً من مارس 2024، مما يشير إلى التجدد المختلط. وعلى العكس من ذلك، في المناطق الأكثر تضرراً، تظل قيم مؤشر الغطاء النباتي الموحد منخفضة، مما يشير إما إلى تأخير ملحوظ في ديناميكيات التجديد أو إلى انتقال نحو مجتمعات نباتية أكثر رائدة أو محبة للشمس، مثل التكوينات العشبية أو الشجيرات.

### Abstract

Temporal analysis of NDVI between September 2022 and March 2024 confirms a gradual recovery of vegetation cover in moderately affected areas, with positive NDVI values from March 2024 onward, indicating mixed regeneration. Conversely, in the most affected areas, NDVI values remain low, indicating either a marked delay in regeneration dynamics or a transition toward more pioneer or heliophilous plant communities, such as herbaceous or scrubby formations.

