

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE DES RESSOURCES
HYDRAULIQUES ET DE LA PECHE**

Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur Agricoles

Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts

Le Pin d'Alep en Tunisie : Ecologie, Gestion et Usages



**Ouvrage collectif édité par
Mohamed Larbi KHOUJA**

Edition 2020

Conception de la couverture et de la mise en forme de l'ouvrage :
Tarek Fezzani, Mariem Khouja, Lamia Hamrouni
et Mohamed Larbi Khouja

Edition 2020

ISBN: 978-9973-0994-0-2

Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts
(INRGREF) - IRESA - MINISTERE DE L'AGRICULTURE
Université de Carthage

Téléphone : 71 719 630 – 71 230 039
Fax : 71 717 951

www.inrgref.agrinet.tn
www.iresa.agrinet.tn

Le Pin d'Alep en Tunisie : Ecologie, Gestion et Usages

Ministère de l'Agriculture des Ressources
Hydrauliques et de la Pêche

Institution de la Recherche et de
l'Enseignement Supérieur Agricoles



Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université de Carthage

Institut National de Recherches en Génie
Rural, Eaux et Forêts



Laboratoire
Ecologie Forestière



Laboratoire
Gestion et Valorisation des
Ressources Forestières



Projet INCREDIBLE



1957-2017
**soixantenaire de la recherche
forestière**

Ouvrage collectif édité par :
Mohamed Larbi KHOUJA

Coordination et Comité de rédaction :
Mohamed Lahbib BEN JAMAA
Hamed DALY HASSEN
Mohamed Larbi KHOUJA

Liste des auteurs

Adel ABADA
Kais ABDELMOULA
Ali ALOUI
Sofien AZZOUZ
Chaima AMIRI
Youssef AMMARI
Ismail AMRI
Abdelaziz AYARI
Mokhtar BARAKET
Samir BEL HAJ SALAH
Med Lahbib BEN JAMAA
Mouna BOULAARES
Naceur BOUSSAIDI
Abdelbasset BOUZAIENE
Kévin CANDELIER
Sameh CHERIF
Samir DHAHRI
Hamed DALY HASSEN
Mohamed Tahar ELAIEB
Farah ELEUCH
Abdelmajid EI HAMROUNI
Kaouther EI HAMROUNI
Ali EL KHORCHANI
Sabri EL WELLANI
Olfa EZZINE
Sami FATTOUCH
Tarek FEZZANI
Sondos FKIRI
Samia GARGOURI
Hanène GHAZGHAZI
Yasmine GTARI
Bassem JAMOSSI
Wahbi JAOUADI
Lamia HAMROUNI
Mohsen HANANA
Habib KACHOURI
Abdelhamid KHALDI
Mariem KHOUJA
Med Larbi KHOUJA
Amor M'BARKI
Kaouther MECHERGUI
Rania MECHERGUI
Manel MEJRI
Messaoud MELIANE
Faten MEZNI
Mokhtar MOKHTAR
Salem SEBEI
Foued SHEL
Naoufel SOUAYEH
Ibtissem TAGHOUTI
Issam TOUHAMI
Meriem ZOUAOU

Edition 2020

Préface

Il m'est agréable de préfacier cet ouvrage de synthèse, fruit d'un effort collectif réalisé en Tunisie sur le pin d'Alep. Coordonné par le Dr. Mohamed Larbi Khouja, l'ouvrage est rédigé par des chercheurs de l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), institution dont l'occasion m'a été donnée à deux reprises dans les années 2000 d'évaluer les programmes de recherche ensemble avec le regretté Dr. Mohamed Skouri.

Nous savons tous que le pin d'Alep, essence forestière méditerranéenne par excellence, est bien représenté dans le grand Maghreb, du Maroc à la Tunisie. S'étendant de l'aride supérieur au subhumide et poussant sur une gamme de substrats engendrant des sols allant du brun forestier aux rendzines plus ou moins épaisses, ses forêts en Tunisie colonisent la frange sud de la Kroumirie et des Mogods, les collines des Hauts Plateaux et les Djebels de la dorsale. Il se retrouve en peuplements purs au-delà de 1000 mètres d'altitude, en mélange avec le genévrier oxycèdre, le chêne vert, le pistachier térébinthe ou avec les très rares îlots de l'érable de Montpellier. Dans sa partie centro-méridionale, il entre en contact avec le genévrier rouge et les espèces steppiques, particulièrement avec l'alfa. Les parties dégradées de ses forêts sont envahies par le calycotome ou par des xérophytes épineux. Au niveau des golfes de Tunis et de Hammamet, il cède la place au thuya et au chêne kermès.

Les forêts de pin d'Alep furent longtemps, sinon ignorées, du moins reléguées au second plan au profit des forêts de chêne zeen et de chêne-liège de la partie septentrionale du pays. Abandonnées à elles-mêmes, ou plutôt aux troupeaux, aux délits de coupe et de défrichement et aux incendies malgré la vigilance des forestiers, elles ne furent vraiment l'objet d'intérêt de la part des autorités qu'à partir de la Seconde Guerre mondiale, comme source d'approvisionnement en bois de chauffage et de combustible pour les gazogènes. Pourtant, pour les services écologiques, économiques et sociaux qu'elles rendent et pour les produits qu'elles fournissent (bois de sciage et de trituration, perches, poteaux, fourrage, miel, huiles essentielles, graines...), ces forêts méritent bien plus d'égards, compte tenu notamment des qualités intrinsèques de l'espèce (rusticité, frugalité, résistance au froid et aux sécheresses, facilité de régénération naturelle,...).

La Station des recherches forestières (SRF) créée en 1957, appuyée d'abord par des chercheurs de l'ORSTOM, puis par des spécialistes de la FAO, devenue Institut national de recherches forestières (INRF) puis INRGREF, a consacré à l'espèce et à ses forêts de nombreux travaux tout au long de ses plus de soixante ans. Aux résultats de ces recherches s'est ajoutée l'expérience acquise dans la rédaction et la mise en exécution de plans d'aménagement des forêts de pin d'Alep. Cependant, la surexploitation de celles-ci dans un contexte de conditions climatiques contraignantes et

de pression humaine accrue a fortement pesé sur leur pérennité et réduit leur productivité.

Riche de résultats de recherches et d'informations présentées d'une manière synthétique, le présent ouvrage comprend 16 chapitres couvrant l'ensemble des disciplines de la foresterie appliquées au pin d'Alep et à ses forêts. Les thèmes abordés portent sur l'écologie, la physiologie, la génétique, la phytosociologie, la sylviculture, l'entomologie, l'aménagement, les parcours, la socio-économie, la production, la biotechnologie de l'espèce (bois et produits non ligneux) dans le contexte tunisien. Au-delà de cet ensemble de connaissances, il ouvre des perspectives pour de nouveaux thèmes peu ou pas abordés jusqu'ici.

Le transfert d'une bonne partie de ces travaux dans la pratique a conditionné manifestement la physionomie des forêts de pin d'Alep les faisant passer par exemple de la structure perturbée d'une futaie jardinée à celle d'une futaie régulière. Elle a ainsi orienté leur gestion tout le long des quelque 70 années qui nous séparent des premiers écrits de Paul Boudy, père de la sylviculture nord-africaine.

Il faut féliciter le Dr. Mohamed Larbi Khouja et ses collègues pour avoir produit cet ouvrage multidisciplinaire sur une espèce forestière méditerranéenne emblématique. En synthétisant, dans un langage accessible et sans pédanterie, l'état des connaissances sur le pin d'Alep dans les différents bioclimats du pays, bioclimats que l'on retrouve tout autour du Bassin méditerranéen, ils ont rendu un grand service aux gestionnaires et autres praticiens forestiers, non seulement tunisiens mais aussi d'autres pays de la région. Ce travail pourra susciter des échanges fructueux par delà les frontières ; et faciliter, dans son sillage, et celle des ouvrages précurseurs de Gérard Soulères et d'Ibrahim Nahal, la réalisation d'autres travaux sur le pin d'Alep à l'échelle maghrébine et méditerranéenne.

En conclusion, je ne saurais trop encourager ces jeunes et moins jeunes chercheurs de l'INRGREF à redoubler d'efforts pour comprendre mieux encore le pin d'Alep, et les biens et services que ses écosystèmes peuvent fournir. Et, ce faisant, à continuer de proposer des solutions concrètes applicables sur le terrain qui permettront, dans le cadre d'une coexistence apaisée des forêts avec leurs usagers, et tenant compte du réchauffement climatique, un développement forestier durable, en nourrissant l'espoir que le pays redevienne véritablement "Tunisie la verte".

Paris le 5 février 2020

Jean-Paul Lanly,

ancien Directeur de la

Division des ressources forestières de la FAO (1984-1996)

Avant propos

Le pin d'Alep représente la première espèce forestière autochtone en Tunisie de par l'étendue de sa couverture forestière et son intérêt socio-économique. C'est aussi la principale espèce de reboisement.

L'idée d'écrire un livre sur le pin d'Alep a émané d'une proposition de l'INRGREF en marge des activités de recherche entreprises dans le cadre du projet PGIF (Projet de Gestion Intégrée des Forêts), mis en oeuvre par la DGF. Son élaboration a émergé d'une conviction partagée de plusieurs chercheurs de l'INRGREF de renforcer l'interface entre la science et la politique forestière qui vise essentiellement à mettre les connaissances scientifiques au service du développement forestier. Le produit final est l'aboutissement d'un effort collectif et d'une collaboration pluridisciplinaire à laquelle ont adhéré des chercheurs, enseignants et agents de développement. Il essaie surtout de montrer l'avancée des résultats de recherche sur cette espèce depuis les premiers travaux entrepris par Soulères en 1969 (Le pin d'Alep en Tunisie).

Grâce à sa polyvalence, ce document se veut un ouvrage de référence destiné pour une large gamme de lecteurs : chercheurs, enseignants, étudiants, techniciens, aménagistes, consultants, décideurs et grand public. L'ouvrage comprend 366 pages et se compose de 16 chapitres, traitant différentes thématiques d'une manière synthétique. Le contenu des chapitres est basé sur une analyse des enseignements tirés d'une expérience tunisienne de plus de 50 ans. Toutefois, l'ouvrage ne prétend pas présenter tout ce qui a été fait comme travaux de recherche sur cette espèce à cause de la difficulté d'accès à l'information, ou par faute de disponibilité des publications. Néanmoins, l'ouvrage comprend un nombre important de références bibliographiques devant permettre au lecteur avisé, d'aller plus loin et de remonter à l'information dans ses plus amples détails dans les références indiquées.

Précisons encore que l'ouvrage est un travail d'équipe auquel Dr Mohamed Lahbib BEN JAMAA et Dr Hamed DALY-HASSEN ont contribué activement à sa coordination et assuré les premières lectures des chapitres soumis. Il a fait par la suite l'objet d'une lecture critique par des Professeurs distingués, spécialistes en la matière : Messieurs Mohamed Néjib REJEB, Brahim HASNAOUI et Lamjed TOUMI. Aussi bien l'éditeur que les auteurs des chapitres leur sont redevables et tiennent à leur exprimer leurs vifs remerciements d'avoir consenti beaucoup d'effort dans la lecture du manuscrit et contribué par leurs remarques et suggestions à une nette amélioration de son contenu. Je voudrais enfin remercier Monsieur Jean-Paul LANLY, ancien Directeur de la Division des ressources forestières de la FAO qui a accepté avec bienveillance de faire la préface de l'ouvrage malgré ses nombreuses occupations et contraintes.

L'éditeur

Mohamed Larbi KHOUJA

Sommaire

Préface	IV
Avant propos	VI
CHAPITRE 1 : Intérêt forestier et caractéristiques biologiques et écologiques du pin d'Alep en Tunisie. Mariem Khouja, Ibtissem Taghgouti, Mohamed Taher Elaieb, Tarek Fezzani, Naoufel Souaeh et Mohamed Larbi Khouja	8
CHAPITRE 2 : Variabilité et amélioration génétique du pin d'Alep. Mohamed Larbi Khouja, Mariem Khouja, Abdelaziz Ayari, Kaouther Mechergui, Wahbi Jaouadi, Adel Abada et Naoufel Souayah	31
CHAPITRE 3 : Evolution de l'écosystème pin d'Alep dans un contexte de changement climatique. Ali Khorchani, Issam Touhami et Abdelmajid Hamrouni.	61
CHAPITRE 4 : Les groupements végétaux du Pin d'Alep et leur dynamique en Tunisie. Abdelmajid El Hamrouni, Kaouther El Hamrouni-Aschi et Ali khorchani	85
CHAPITRE 5 : Caractérisation écophysiological du pin d'Alep en Tunisie. Sondes Fkiri, Hanene Ghazghazi, Mokhtar Baraket, Sameh Chérif, Mohamed Larbi Khouja et Zouhair Nasr	115
CHAPITRE 6 : La fructification des forêts du pin d'Alep en Tunisie. Abdelaziz Ayari.	131
CHAPITRE 7 : Les principaux extractibles du pin d'Alep Tunisien : leurs propriétés physico-chimiques, activités biologiques et applications. Lamia Hamrouni, Ismail Amri, Mariem Khouja, Mohsen Hanana, Samia Gargouri, Mohamed Larbi Khouja et Bassem Jamoussi	146
CHAPITRE 8 : Techniques de régénération du pin d'Alep en Tunisie. Wahbi Jaouadi, Naceur Boussaidi, Kaouther Mechergui, Ali Aloui, Messaoud Meliane, Abdelhamid Khaldi et Mohamed Larbi Khouja	168
CHAPITRE 9 : La sylviculture du pin d'Alep en Tunisie. Wahbi Jaouadi, Naceur Boussaidi, Kaouther Mechergui, Ali Aloui, Messaoud Meliane, Sabri El Wellani et Mohamed Larbi Khouja	189
CHAPITRE 10 : La santé du pin d'Alep en Tunisie. Mohamed Lahbib Ben Jamâa, Manel Mejri, Samir Dhahri, Olfa Ezzine, Meriem Zouaoui, Samir Bel Haj Salah.	204
CHAPITRE 11 : Lois de croissance et production en bois du pin d'Alep en Tunisie. Wahbi Jaouadi, Naceur Boussaidi, Kaouther Mechergui, Ali Aloui, Messaoud Meliane, Mokhtar Aloui, Youssef Ammari et Mohamed Larbi Khouja	236
CHAPITRE 12 : Les incendies dans les forêts de pin d'Alep en Tunisie : historique et stratégie de lutte. Salem Sebei, Kais Abdelmoula, Abdelhamid Khaldi et Samir Belhaj.	251

- CHAPITRE 13 : Parcours et troupeaux dans l'aire du Pin d'Alep. Abdelmajid El Hamrouni, Kaouther El Hamrouni-Aschi, Ali Khorchani et Rania Mechergui
274
- CHAPITRE 14 : Le bois du pin d'Alep Tunisien : propriétés, potentialités et débouchés. Mohamed Tahar Elaieb, Habib Kachouri, Sofien Azzouz, Foued Shel, Mohamed Larbi Khouja et Kévin Candelier
292
- CHAPITRE 15 : Avantages socio-économiques de la forêt du pin d'Alep. Hamed Daly-Hassen et Abdelaziz Ayari
325
- CHAPITRE 16 : Valorisation agro-alimentaire et qualités nutritionnelles des graines du pin d'Alep. Mariem Khouja, Farah Eleuch, Chaima Amiri, Mouna Boulaares, Yasmine Gtari, Sami Fattouch, Faten Mezni, Abdelbasset Bouzaiène et Mohamed Larbi Khouja
350

CHAPITRE 1

Intérêt forestier et principales caractéristiques biologiques et écologiques du pin d'Alep en Tunisie

Mariem Khouja, Ibtissem Taghouti, Abdelaziz Ayari, Mohamed Taher Elaieb, Tarek Fezzani, Naoufel Souayeh et Mohamed Larbi Khouja

Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), B.P. 10, 2080 Ariana, Université de Carthage, Tunisie

Email: khouja.mar@gmail.com ; khouja.larbi15@gmail.com

Résumé. De par sa couverture forestière, ses faibles exigences écologiques et son rôle socio-économique, le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) s'affirme comme la première espèce forestière de la Tunisie. Malgré un potentiel de production limité et des conditions environnementales peu favorables, la forêt de pin d'Alep pourvoie des biens multiples et occupe une place prépondérante dans le secteur forestier. Parmi les usages possibles, la production des graines à des fins de consommation humaine a la valeur commerciale la plus élevée et s'est imposée comme un objectif prioritaire dans l'économie forestière.

Le pin d'Alep est un arbre de taille moyenne (12 m de hauteur à l'âge adulte). Cependant, son caractère polycyclique semble avoir une incidence défavorable sur sa forme générale, en termes surtout de fréquence de fourches et de sinuosité du tronc.

A l'échelle de son aire de répartition tunisienne, le pin d'Alep affiche une plasticité des plus remarquables, puisqu'il réussit à coloniser de vastes territoires et à s'adapter à des conditions climatiques et édaphiques des plus variées. Sur le plan climatique, le pin d'Alep peut se trouver dans des bioclimats variés et contrastés : subhumide, semi-aride et aride. Cependant, le semi-aride reste l'étage bioclimatique caractéristique de cette espèce puisque la majeure partie des pineraies est sous sa dominance.

Le pin d'Alep est qualifié comme étant une essence xérophile. Il se développe essentiellement dans la tranche pluviométrique comprise entre 350 et 450 mm, mais il peut se contenter de 200 mm de pluies dans les zones arides. En plus, son caractère thermophile lui permet de supporter des chaleurs excessives en saison estivale. Du point de vue édaphique, le pin d'Alep est une espèce calcicole, on le rencontre essentiellement sur des sols calcimorphes (type brun calcaire et rendzines). Le pin d'Alep se distingue par une fructification abondante. L'entrée en fructification est observée à l'état naturel vers 8-12 ans, mais elle peut être beaucoup plus précoce (2 ans) dans des conditions relativement plus favorables.

Mots-clés : Pin d'Alep, *Pinus halepensis*, répartition géographique, écologie, fructification.

Abstract. Forest interest and biological and ecological characteristics of Aleppo pine in Tunisia. The Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) is characterised by its wide spread forest cover, its low ecological requirements and socio-economic role. The Aleppo pine forest has an important contribution to the forest sector and provides multiple goods even in unfavorable environmental conditions and limited production areas. The production of seeds for human consumption, among other products; has the highest commercial value and has become the main objective in the forest economy.

The mature trees have an overall total height of about 12m. However, its polycyclic traits seem to have an unfavorable effect on the tree's general shape, especially in terms of frequency of forks and sinuosity of the trunk.

In Tunisia, the Aleppo pine displays a significant plasticity due to its well thrive to occupy large areas and by adapting various climatic and edaphic conditions. Equally, this species can be found in different and contrasting bioclimatic zones extended from the sub-humid and the semi-arid to the arid area. Nonetheless, the semi-arid bioclimatic zone remains the largest ecological forest zone of the species where the wide Aleppo pine forest cover is observed. Likewise, the Aleppo pine is illustrated as a xerophilic coniferous species. Its mean rainfall range is showed between 350 and 450 mm. Furthermore, the species can be satisfied with only 200mm within the arid bioclimatic zone due to its thermophilic character allowing it to withstand high temperatures during drought periods. Similarly, the species is found in red or brown calcareous soils developed from calcareous bedrock. Massive cone production is observed for Aleppo pine tree in natural forests between 8 and 12 years old. Possible earlier fructation of the species is also recorded for trees with two years old in mechanized plantations soil with favourable conditions.

Keywords: Aleppo pine, *Pinus halepensis*, geographical distribution, ecology, fruiting, Tunisia.

1. Introduction

De par sa couverture forestière, son adaptation remarquable et son rôle socio-économique, le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) s'affirme comme la première espèce forestière de la Tunisie. C'est grâce à sa rusticité et robustesse qu'il a pu survivre et défier toutes les vicissitudes qu'il a subies dans toutes les époques les plus marquantes s'étant succédé en Tunisie (Khouja, 1997). Parmi les espèces forestières présentes en Tunisie, le pin d'Alep se démarque par sa présence dans des régions très contrastées dont certaines sont marquées par des conditions pédoclimatiques les plus difficiles et les plus ingrates. Là où il se trouve, il a toujours marqué le paysage par sa silhouette, la teinte de son feuillage et l'abondance de sa fructification. Ses caractéristiques biologiques et

écologiques font de cette essence une espèce plastique bien adaptée aux conditions méditerranéennes. Le présent chapitre est une esquisse générale introductive aux chapitres suivants qui essaie de mettre en exergue l'intérêt du pin d'Alep en tant qu'espèce forestière, les principales caractéristiques de l'espèce, d'une part, pour la décrire et, d'autre part, pour mieux comprendre son comportement et ses potentialités dans le contexte tunisien.

2. Intérêt forestier et limites de productivité du pin d'Alep

Le pin d'Alep est un élément essentiel dans le paysage Tunisien et un capital économique très important pour le secteur forestier. Cependant, les forêts que l'on retrouve de nos jours, un peu partout à travers le pays, ont perdu leur caractère originel et se sont retrouvées dans un état de faiblesse et de dégradation très poussé, un état jugé très préjudiciable à leur pérennité et à leur survie. Ce sont principalement la pression humaine qui s'est longtemps exercée sur ces forêts et les fléaux qui les ont frappées qui sont à l'origine de leur structure actuelle. En effet, en plus de l'impact du changement climatique, le pin d'Alep a été longtemps soumis à de nombreuses adversités : incendies répétés, pâturages intensifs, exploitations abusives, défrichements illicites..., tous ces facteurs combinés ont entraîné la disparition de nombreuses forêts et leur substitution par des formations buissonnantes improductives ou par des friches déboisées et soumises à l'érosion.

On reste quand même persuadé, qu'on est en mesure de remédier à toutes ces anomalies et insuffisances moyennant une volonté et une politique clairvoyante de la part des acteurs politiques et des gestionnaires du milieu forestier. Une telle politique devrait se traduire par la prise d'un ensemble de mesures qui devraient déboucher sur des solutions durables pour les populations forestières (à titre d'exemples : encourager les gens à se regrouper dans des GDA pour l'exploitation des produits de la forêt, aider les jeunes à créer leurs propres micro entreprises, créer de nouveaux emplois dans d'autres secteurs d'activités indépendantes des forêts...). La mise en œuvre d'un tel plan de

réforme suppose une révision des textes législatifs (code forestiers et certaines lois) et aussi un grand effort de sensibilisation des populations forestières.

Malgré un potentiel de production limité et des conditions environnementales peu favorables, la forêt de pin d'Alep pourvoie des biens multiples et occupe une place prépondérante et privilégiée dans l'économie forestière du pays. Si certains de ces biens sont chiffrables, puisqu'on peut les quantifier et estimer leur coût (produits directs tels que les différents assortiments du bois exploitée, les unités fourragères produites par unité de surface..., d'autres, aussi importants, ne sont pas chiffrables et sont difficiles à estimer (conservation des eaux et du sol, fonction environnementale (qualité de l'air), loisirs etc...).

De point de vue usages, le pin d'Alep a été longtemps utilisé comme source principale pour la production du bois servant à des utilisations très variés aussi bien domestiques qu'industrielles. Cependant, l'absence d'une sylviculture adéquate et d'un aménagement adapté à son tempérament, d'une part, l'ignorance des caractéristiques technologiques de son bois, d'autre part, n'ont pas favorisé une exploitation forestière rationnelle ce qui a réduit considérablement l'emploi de son bois dans le domaine industriel. Avec les nouvelles connaissances acquises sur les qualités intrinsèques du bois (Elaieb, 2010 ; 2017a ; 2017b ; 2019) et le recours à de nouveaux procédés d'exploitation et de transformation précisant des règles sylvicoles appropriés, il est devenu possible de le valoriser d'une manière beaucoup plus intéressante et d'en tirer un meilleur profit (Douheret, 1992 ; Couhert et Duplat, 1993 ; El Aieb *et al.*, 2019).

Par ailleurs, la pinède a toujours joué un rôle social pour les populations qui y vivaient avec leurs troupeaux et continué à assurer leur subsistance ainsi que celle de leur cheptel. Les populations vivant en plein forêt ou à sa périphérie sont généralement très pauvres. En effet, 34% de la population forestière vit sous le seuil de pauvreté, contre 26% à l'échelle nationale (Programme d'investissement forestier en Tunisie, 2016). Les indicateurs socio-économiques des régions forestières font ressortir une dépense moyenne annuelle par tête de 1100 dinars Tunisiens contre 1350 dinars au niveau national, avec un taux de chômage de

20% contre 14% à l'échelle nationale (Programme d'investissement forestier en Tunisie, 2016) Pour survivre et gagner leur vie, elles se trouvent souvent obligées de s'attaquer à la forêt en la défrichant, afin de gagner quelques mètres carrés transformés en terrain de culture vivrière. Les cultures étant très limitées et trop maigres pour subvenir à leurs besoins quotidiens à cause de l'aridité du climat, le pastoralisme reste la seule source de revenu pour une majorité écrasante de ces populations. Cette activité est basée sur des parcours extensifs dominés essentiellement par le mouton et la chèvre. Le surpâturage est estimé à 25% pour le parcours des forêts de pin d'Alep sous bioclimat semi-aride et passe à 50% sous bioclimat aride (El Hamrouni, 1978 ; El Hamrouni *et al*, 2019). Les animaux qui se trouvent toujours en surnombre sont donc obligés de se partager un maigre pâturage très en deçà de leurs besoins (El Hamrouni *et al*, 2019). Pour les usagers, l'herbe prime l'arbre ; ils n'hésitent pas à recourir à la hache et au feu pour détruire arbres et buissons rien que pour faire pousser l'herbe et l'offrir à leur bétail.

Une autre utilisation du pin d'Alep consiste à récolter les graines ou zgougou pour les besoins de consommation humaine. Du fait que les graines de pin soient fortement prisées par les tunisiens et devenant indispensables surtout à l'occasion du Mouled saint la demande en ce produit n'a pas cessé de croître lors de cette dernière vingtaine d'années. En effet, la consommation nationale est estimée à 1,5 kg de graines ou 500 g de zgougou moulu par famille et par an avec une tendance à la hausse (DG-ACTA, 2015). Une tendance récente est la mise en vente de zgougou sous forme de pâtes prêtes à la consommation, conditionnées en pots de 500g. Déjà 50% de la production du zgougou vrac rentre dans la transformation en zgougou moulu. Ceci va augmenter surtout que les consommateurs dans les centres urbains préfèrent de plus en plus la « pâte » prête à manger (Institut National de la consommation, 2016).

Les graines de pin classées comme un PFNL sont devenues dès lors une source de revenue très importante pour le secteur forestier et une activité sociale bien reconnue et qui profite aux nombreuses familles spécialisées dans son exploitation. Les revenus des ménages dans les zones forestières, nettement

inférieurs à la moyenne nationale, dépendent très fortement de la production agricole et des produits forestiers, qui représentent chacun environ 40% des revenus totaux des ménages. Dans certains gouvernorats producteurs des graines de pin d'Alep, la part du revenu forestier par rapport au revenu total des ménages peut dépasser 60% (Programme d'investissement forestier en Tunisie, 2016). Devant cette nécessité, la production en graines s'est imposée comme un critère économique et un objectif prioritaires dans l'exploitation forestière, devançant nettement la production de bois, longtemps considérée comme un objectif principal.

3. Situation taxonomique et diversité génétique

Le pin d'Alep a reçu plusieurs noms mais les botanistes ont fini par adopter celui que Miller lui a attribué en 1768 : "*Pinus halepensis*".

Sur le plan taxonomique, *Pinus halepensis* Mill. appartient au genre *Pinus* de la famille des Pinacées (Gausson, 1960 ; Mirov, 1967). De nombreuses études ont montré la présence d'un polymorphisme marqué au sein de l'espèce *Pinus halepensis*, longtemps confondue avec une espèce affine : *Pinus brutia* Ten (Moulopoulos et Bassiotis, 1961 ; Panetsos, 1975). Nahal (1962) fut le premier à identifier des entités géographiques distinctes à partir d'observations morphologiques du pollen. D'autres recherches basées sur des expérimentations pratiques de provenances se sont succédé par la suite pour confirmer l'existence d'une variabilité intra spécifique importante des points de vue morphologique, physiologique, biochimique, croissance... (Palmberg, 1975 ; Bellefontaine et Raggabi, 1977 ; Falusi et Calamassi, 1983 ; Spencer, 1985 ; Calamassi, 1986 ; Eccher *et al*, 1987 ; Grunwald et Schiller, 1988 ; Baradat *et al*, 1989 ; 1995 ; Bariteau, 1992 ; Khouja, 1993 ; 1997, 2001a, 2001b, Khouja et Sgahier, 2000, Khouja *et al*, 2000 ; 2006 ; Khouja, 2016).

4. Aire de répartition naturelle

4.1. Aire de répartition à l'échelle du pourtour du bassin méditerranéen

L'aire de répartition du pin d'Alep est circumméditerranéenne mais présente des discontinuités parfois marquées en certaines zones (figure 1).

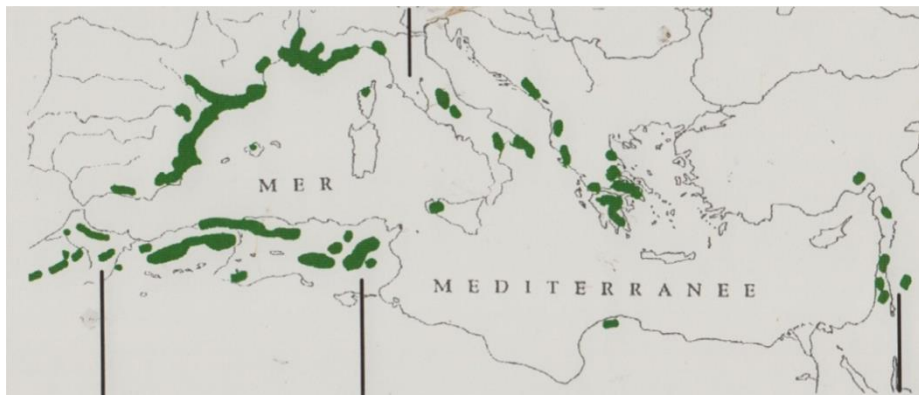


Figure 1: Aire de répartition géographique du pin d'Alep à l'échelle du pourtour du bassin méditerranéen (Nahal, 1962).

Le pin d'Alep est fréquent dans la partie occidentale (Ouest) et centrale de part et d'autre de la Méditerranée ; mais sa présence est limitée dans la partie orientale (Moyen Orient). Ce morcellement est à attribuer principalement aux transgressions marines qui ont présidé à la formation de la Méditerranée et également aux glaciations du Quaternaire favorisant son installation ou au contraire son élimination en plusieurs points de son aire d'extension primitive (Biju-Duval *et al.*, 1976).

A l'échelle de son aire de répartition géographique, tout autour du pourtour du bassin méditerranéen, le pin d'Alep couvre d'après Nahal (1962) une superficie qui dépasse les 3,5 millions d'hectares. Le tiers de cette superficie se trouve en Algérie et en Tunisie, ces deux pays constituent de ce fait son centre de gravité.

4.2. Aire de répartition à l'échelle de la Tunisie

A l'échelle de la Tunisie, la majorité des forêts de pin d'Alep est comprise entre les deux limites physiques matérialisées au Nord par le cours de Mejerda et au Sud par la ligne qui relie Feriana à la mer au niveau de la ville d'Enfidha (figure2).

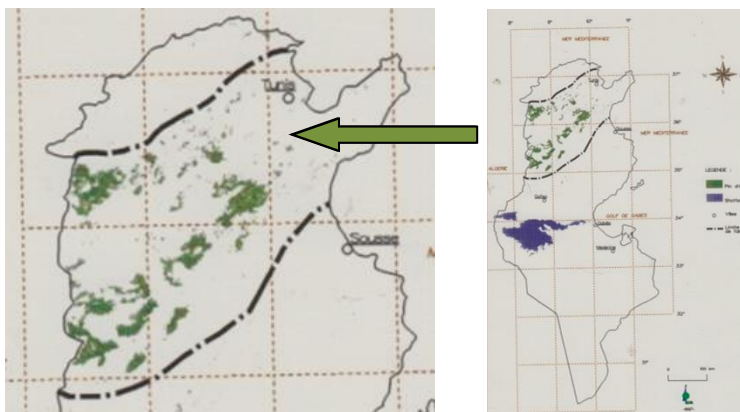


Figure 2 : Aire de répartition géographique du pin d'Alep en Tunisie selon l'IFPN édité en 2010 (DGF, 2010).

Le pin d'Alep est généralement de tempérament continental, sa présence dans certaines stations côtières est très limitée et son origine naturelle est contestée. Toute la zone d'extension naturelle du pin d'Alep est xérothermique comme c'est attesté par l'omniprésence de l'alfa (*Stipa tenacissima* L.) plante typiquement steppique. A l'extrémité Sud de la zone d'extension du pin d'Alep, l'apparition de l'armoise (*Artemisia herba-alba* Asso.) marque sa limite bioclimatique inférieure. Au Nord-Ouest, le pin d'Alep a tendance à s'infiltrer dans la subéraie et à s'implanter dans les faciès dégradés de l'oléo-lentisque à caroubier. Au Cap Bon où il fait quelques apparitions, le pin d'Alep se trouve en contact direct avec le thuya de Berbérie (*Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast.), dans les stations soumises à l'influence maritime, il est fortement concurrencé par lui et lui cède la place.

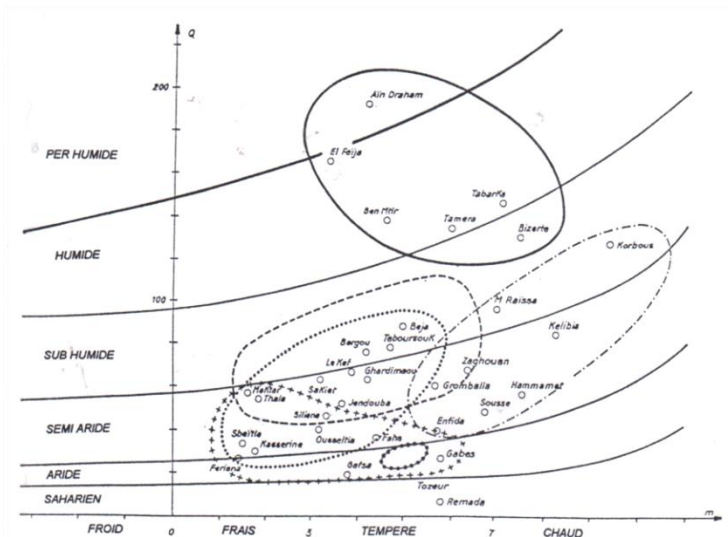
Avec une superficie de l'ordre de 361 222 ha de forêts pures (80% de la superficie nationale de Pin d'Alep sont répartis entre les gouvernorats de Kasserine, du Kef et de Siliana), le pin d'Alep est l'espèce forestière dominante selon le 2^{ème} inventaire forestier et pastoral national : IFPN édité en 2010 (DGF, 2010).

5. Principales caractéristiques et spécificités du pin d'Alep

5.1. Caractéristiques écologiques

Du point de vue écologique, le pin d'Alep affiche à l'échelle de l'ensemble de son aire de répartition une plasticité des plus remarquables, puisqu'il réussit à coloniser de vastes territoires et à s'adapter à des conditions climatiques et édaphiques les plus variées.

En Tunisie, les forêts de pin d'Alep tirent surtout leur originalité des conditions climatiques aux quelles elles sont soumises. Ces conditions climatiques sont la résultante de deux influences opposées, la première : méditerranéenne relativement humide, la deuxième : saharienne beaucoup plus xérique. L'influence méditerranéenne touche toute la partie Nord de la Dorsale et une étroite bande d'une trentaine de kilomètres sur le littoral ; le reste du territoire qui se trouve au dessous de la Dorsale est steppique et soumis à un climat aride et désertique. Dans ce contexte climatique général, selon sa situation géographique et le degré de sa continentalité, le pin d'Alep peut se trouver en bioclimat subhumide, semi-aride ou encore aride. Cependant, le semi-aride reste l'étage bioclimatique caractéristique de cette espèce puisque la majeure partie des pineraies est sous sa dominance. Le climagramme établi par El Hamrouni (1978) précise les limites bioclimatiques du pin d'Alep climacique en comparaison avec d'autres espèces tunisiennes les plus importantes (figure 3).



..... *Pinus halepensis* ; : *Acacia tortilis* ; ----- : *Quercus ilex* ;
 _____ : *Quercus sp.* ; -.-.-.- : *Tetraclinis articulata* ; + + + + : *Stipa tenacissima*
 Q : Quotient d'Emberger ; m : température moyenne des minima du mois le plus froid

Figure 3 : Projection du pin d'Alep et d'autres espèces forestières sur le climagramme d'Emberger à l'échelle de la Tunisie (EL Hamrouni, 1978).

Ces conditions bioclimatiques se traduisent par des exigences écologiques très modestes. En effet, la plupart des pinèdes à pin d'Alep se développe dans la tranche pluviométrique comprise entre 350 et 450 mm. Cependant, vu sa grande plasticité et son tempérament xérophile, le pin d'Alep peut se contenter de quantités de pluies beaucoup plus réduites pouvant descendre jusqu'à 200 mm dans la zone aride. Sur le plan thermique, c'est une espèce thermophile et peut même supporter des chaleurs excessives en saison estivale. Par contre, des températures basses peuvent occasionner des dégâts importants aux jeunes plants et conduisent même au dépérissement d'un nombre important de jeunes arbres. Si l'on considère la moyenne des minima du mois le plus froid (m), le pin d'Alep apparaît entre des valeurs comprises entre -3 et +10 °C ; d'après Quezel (1985) ce paramètre conditionne sa présence et sa distribution, des températures inférieures à sa limite inférieure (-3° C) constituent l'un des principaux facteurs limitants pour le développement et la survie de l'espèce.

Du point de vue altitudinal, la grande majorité des pineraies se rencontre à une altitude comprise entre 800 et 1200 m où la continentalité est accusée. Cependant, le pin d'Alep peut monter jusqu'à 1500 m d'altitude à l'intérieur du continent (Jebel Chaambi) comme il peut descendre à des altitudes faibles dans le littoral (Oued El Bir dans le Cap Bon). Quand il se trouve à proximité de la mer, il supporte moins bien les embruns marins.

Concernant le substrat géologique, le pin d'Alep est indifférent à la nature physico-chimique de la roche mère et pousse sur des substrats très variés qu'ils soient acides ou basiques, argileux ou sableux, pourvus en calcaire ou décalcifiés. Mais, sur ces différentes roches mères, il ne se comporte pas de la même manière et ne pourvoit pas la même vigueur et la même production ligneuse. On remarque que la majeure partie des forêts se développe sur des substrats calcaires et calcaro-marneux.

Sur le plan édaphique, si le pin d'Alep est considéré comme indifférent à la nature du sol, il est cependant possible de mettre en évidence les types de sol qui lui sont favorables ou au contraire qui limitent sa croissance et son développement. Sur ce plan, le pin d'Alep recherche sélectivement les sols meubles bien aérés neutres à alcalins ; par contre, il tolère très mal les sols très légers (sableux) ou à l'inverse les sols compacts et hydromorphes (limoneux et limono-argileux) à cause de l'assèchement des horizons superficiels dans le premier type de sol et l'asphyxie du système racinaire dans le deuxième. Généralement, le pin d'Alep est plus fréquent sur des sols calcimorphes (rendzines et sol brun calcaire essentiellement) et manifeste une certaine préférence pour les colluvions, c'est sur ce type de sol qu'on rencontre les plus belles pineraies de Tunisie (Soulères, 1975). En ce qui concerne sa tolérance en rapport avec la chimie du sol, le pin d'Alep est une espèce calcicole qui supporte des taux importants de calcaire, atteignant 90 % de calcaire total et 40 % de calcaire actif (Marion et Poupon, 1974). Toutefois, vu l'état de dégradation très poussé des forêts de pin d'Alep tunisiennes, on doit remarquer qu'il est difficile de parler de sol sous forêt de pin d'Alep, car en plusieurs points, le support édaphique forestier est presque inexistant et continuellement modifié et remanié

suite au défrichement, au prélèvement de la terre et à l'érosion. Pour cette raison, la plupart des forêts de pin d'Alep qu'on observe actuellement pousse sur des sols squelettiques ou repose directement sur la roche mère.

En plus de sa plasticité, le pin d'Alep présente aussi la particularité de supporter un déficit hydrique important et prolongé, ce qui lui confère une bonne résistance à la sécheresse surtout en période estivale.

Les groupements végétaux qui accompagnent le pin d'Alep sont différents d'un bioclimat à un autre. Le tableau 1 présente les plantes caractéristiques correspondant à chaque étage bioclimatique (Marion et Poupon, 1974).

Tableau 1 : Plantes caractéristiques du pin d'Alep par ambiance bioclimatique (d'après Marion et Poupon, 1974).

Ambiance bioclimatique	Plantes caractéristiques
Humide	<i>Arbutus unedo</i>
Subhumide	<i>Thymus capitatus</i>
Semi-aride supérieur à hivers doux et tempérés	<i>Quercus ilex, Rosmarinus officinalis</i>
Semi-aride supérieur à hivers frais	<i>Rosmarinus officinalis, Erica multiflora</i>
Semi-aride inférieur à hivers frais	<i>Retama sphaerocarpa</i>
Aride supérieur à hivers frais	<i>Thymelia tartonraira</i>

5.2. Caractéristiques morphologiques

Le pin d'Alep est un arbre (Figure 4-a) de taille moyenne. En Tunisie, il peut atteindre à l'âge adulte 12m de hauteur pouvant aller jusqu'à 16m dans les stations fertiles, mais dépasse rarement les 20m. Le pin d'Alep présente au jeune âge une couronne de forme conique qui s'étale au fur et à mesure qu'il vieillit. La couronne a une forme irrégulière, très claire et de couleur vert-jaunâtre typique.

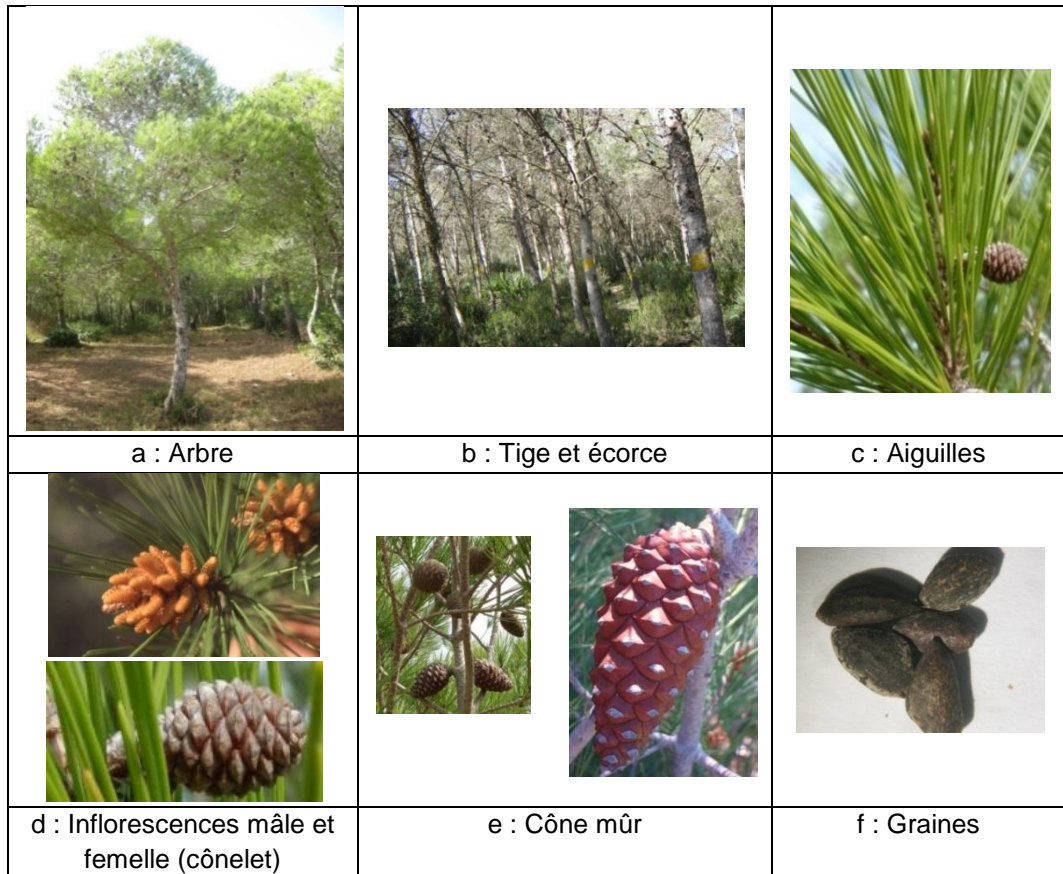


Figure 4 : Pin d'Alep : un arbre avec ses différents organes (photos Mariem Khouja, 2019).

La forme générale et la rectitude du pin d'Alep tunisien sont quelconques et le plus souvent défectueuses : un tronc plus ou moins flexueux et tordu, des fourches assez fréquentes, des branches grosses et persistantes. Ces défauts affectent négativement la qualité du bois et sont à l'origine de son déclassement pour de nombreux usages industriels. Les dégâts occasionnés par le pacage et les mutilations sur les jeunes arbres aggravent et amplifient ces défauts. Cependant, bien qu'ils soient rares, on peut trouver des arbres à fût élancé, bien droits, non fourchus et peu branchus.

Le pin d'Alep présente un modèle architectural caractérisé par des axes ayant tous une croissance monopodiale et un développement orthotrope et par

une ramification rythmique (Thibault *et al*, 1992 ; Martinez, 1993). Le pin d'Alep, comme c'est le cas également chez les autres pins, a la faculté de régénérer de nouveaux axes à partir de branches secondaires pour remplacer les axes principaux qui viennent de disparaître à la suite d'un accident quelconque. La perte de la dominance apicale chez cette espèce se traduit par de nombreuses malformations et provoque des perturbations qui sont responsables de la formation de bois de compression de moindre qualité (Thibault *et al*, 1992).

Par ailleurs, le caractère polycyclique caractérisant le pin d'Alep semble avoir une incidence défavorable sur la forme, du point de vue notamment sinuosité du tronc et fourchaison.

L'écorce du pin d'Alep (Figure 4-b) est lisse et de couleur gris-argenté chez les jeunes arbres et devient écailleuse, plus sombre et de couleur brun-rougeâtre chez les adultes. Le pourcentage de l'écorce chez les arbres adultes est très élevé et peut aller jusqu'à 23-24 %, comparé à celui d'autres pins (pin sylvestre 10 - 15%, pin laricio 17 - 21%) (Nahal, 1962). Cependant, on a remarqué des variations très importantes dans les pourcentages de l'écorce par rapport à la tige selon l'âge, la variante thermique (Soulères, 1975) et le type de sol (Akrimi, 1984, 1985). L'abattement sur le volume peut varier de 15% pour des arbres jeunes de petit diamètre (10 cm) au tiers du volume pour des arbres plus âgés de gros diamètre (35 cm). Si l'on considère la variante thermique, le taux d'écorce est d'autant plus important que la continentalité est plus accusée. Quant au type du sol, on a remarqué que les arbres poussant sur rendzine sur croûte présentent des taux d'écorce plus élevés (15 - 22 %) par rapport à ceux qui poussent sur rendzine sur colluvions ou sur sol brun calcaire (12 - 14 %). De par la richesse de l'écorce en tanin, son utilisation à des fins de tannage est une pratique très ancienne en Tunisie. Avant d'être remplacé par des produits synthétiques, le tanin du pin d'Alep était très recherché et servait au tannage du cuir, des laines ou encore des filets de pêche. Braban (1886) attribue la disparition de grandes superficies de pin d'Alep dans plusieurs points de son aire de répartition tunisienne à l'écorçage des arbres pour l'extraction du tanin.

Le pin d'Alep développe d'habitude un enracinement pivotant avec de fortes racines latérales. Sur des sols superficiels et érodés, l'enracinement est superficiel et on voit souvent apparaître les racines à la surface du sol. Les racines sont puissantes et quand les conditions le permettent elles peuvent s'enfoncer profondément dans le sol. On a réussi de très belles plantations dans la zone périphérique de la ville de Béja (Nord-Ouest de la Tunisie) sur des calcaires durs mis à nus ; sur ces roches le pin d'Alep a réussi à s'ancrer et à se développer d'une manière spectaculaire en infiltrant ses racines à travers les fissures des rochers.

Les feuilles (Figure 4-c) sont des aiguilles fines (1mm), molles, lisses, longues de 5 à 10 cm, généralement fasciculées par 2 et de couleur vert jaunâtre au début qui s'accroît avec l'âge.

Les inflorescences femelles (Figure 4-d) se présentent dès leur apparition sous forme de petits cônes pédonculés en position terminale sur les pousses les plus vigoureuses et de couleur rose violacé. Les inflorescences mâles (chatons) sont regroupés en un pseudo-verticille généralement sur des rameaux inférieurs, oblongs, peu serrés, de couleur jaune avec une teinte orangée.

Les fruits (Figure 4-e) se présentent sous forme de cônes gros de 6 à 12 cm, à pédoncules épais de 1 à 2 cm, à écussons aplatis, souvent isolés et de couleur brun clair luisant. Les cônes mûrissent sur l'arbre ; à maturité complète (3 ans), une partie des cônes s'ouvre et laisse échapper ses graines, une autre plus persistante demeure plusieurs années sur l'arbre sans s'ouvrir (cônes sérotineux). Cet état de sérotinie, allant jusqu'à une vingtaine d'années, peut être interrompue après un déclenchement de feu provoquant ainsi l'ouverture des cônes et la libération des graines.

Les graines (Figure 4-f) sont ailées et de couleur grise et mouchetée de noir. Leur longueur est très différente et varie du simple au double selon les auteurs : de 6 à 8 mm selon Debazac et Tomassone (1965) et de 3 à 4 mm selon Khouja (2016). Le poids des graines est aussi très variable et diffère selon les auteurs. Debazac et Tomassone (1965) indiquent des poids moyens de 1000

graines très différents selon les provenances, de l'ordre de 15,9 grammes pour une provenance française et de 29,6 grammes pour une provenance tunisienne. Quant aux valeurs données par Khouja (2016), le poids moyen de 1000 graines calculé à partir de 21 provenances tunisiennes est de 17 grammes et varie fortement entre 11 et 26 grammes. La forte variabilité de taille et de poids est à attribuer à l'origine géographique des graines dont les conditions du milieu jouent un rôle prépondérant. A titre indicatif, selon la provenance géographique, on peut compter entre 35.000 et 90.000 unités dans un kilogramme de graines.

5.3. Caractéristiques physiologiques et de croissance

Le pin d'Alep est multinodal, il peut exprimer plusieurs cycles morphogénétiques de croissance durant un seul cycle végétatif ; selon les cas, il peut développer des pousses monocycliques ou des pousses polycycliques (Poupon, 1970 ; Serre, 1976). Poupon (1970) a montré que le début et la fin de l'allongement des pousses de pin d'Alep se situent respectivement vers le début du mois de février et vers la fin du mois de juillet de la même année à Zerniza dans la région de Sejnane (au nord-ouest de la Tunisie). Cependant, il peut continuer à croître jusqu'au mois d'octobre. La durée de sa croissance est de 167 jours en moyenne ; elle est relativement plus longue que celle observée chez d'autres pins (*Pinus pinea*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*) se trouvant dans les mêmes conditions. D'après Serre (1992) la croissance en hauteur est liée favorablement à l'indice pluviothermique d'Emberger (Q) et le bilan hydrique annuel. Quant à la croissance en circonférence, elle s'étend généralement sur une plus grande période que l'élongation de la pousse terminale. Poupon (1970) pense qu'elle s'effectue davantage aux dépens des produits photosynthétisés l'année même que des substances de réserve qui seraient utilisées par l'arbre pour son élongation en hauteur.

L'étude réalisée par El Aouni (1980) sur le comportement physiologique du pin d'Alep a permis de mettre en évidence une double stratégie adaptative de l'espèce pour éviter la sécheresse et rationaliser sa productivité en optimisant

ses activités physiologiques par un ensemble de mécanismes propres à l'espèce. Plus précisément, la première stratégie réside dans la régulation stomatique, l'ajustement de l'appareil photosynthétique aux déficits hydriques et la déviation d'une forte proportion des assimilats vers les réserves contenues dans les systèmes foliaires et racinaires aux dépens de la matière ligneuse. La seconde stratégie se traduit par l'exportation des assimilats vers les fruits (cônes).

Sur le plan production ligneuse, le pin d'Alep se révèle peu productif. Les études de Soulères (1975) ont montré que la production des forêts naturelles de pin d'Alep tunisien est très faible puisque jusqu'à l'âge de 80 ans, elle varie de 0,67 à 0,93 m³/ha/an selon le bioclimat et la fertilité du sol. El Aouni (1980) attribue cette faible productivité à la stratégie de répartition des assimilats dans les différentes parties de la plante et dont une forte proportion est exportée vers les cônes aux dépens de la tige et de la production du bois.

5.4. Caractéristiques biologiques

Le pin d'Alep est une espèce diploïde qui compte 24 chromosomes (2n), comme c'est le cas pour la plupart des pins (Mirko, 1991).

Le pin d'Alep est une espèce monoïque, les organes sexuels mâles et femelles sont nettement séparés dans l'architecture de l'arbre (Martinez, 1993). Les inflorescences femelles (cônes) apparaissent en position terminale sur des pousses vigoureuses, alors que les inflorescences mâles (chatons) sont regroupées en un pseudo-verticille généralement sur des rameaux inférieurs.

Selon plusieurs auteurs dont Boudy (1950) et Nahal (1962), le pin d'Alep se reproduit en général vers l'âge de 8-12 ans. Cependant la maturité sexuelle peut se déclencher plus précocement vers 4 ans selon Bellefontaine (1979) voire vers 2 ans selon Khouja (1993). La maturité sexuelle est très variable dans le temps ; elle dépend des conditions du milieu, et semble surtout liée à la croissance de l'arbre : plus l'arbre est vigoureux plus l'aptitude à la fructification est précoce. A Oued Laabid dans la région du Cap Bon sous bioclimat semi-aride, on a remarqué (Khouja, 1993) qu'une préparation mécanique du sol consistant en un

labour profond avant la plantation a favorisé la croissance et l'entrée en fructification des arbres à un âge précoce de deux ans après plantation. La figure 5 reproduit le cycle de fructification du pin d'Alep. Ce cycle a été établi au départ d'observations régulières sur une période de 3 ans (2016 - 2018).

Mûrs l'année même de leur formation, les chatons mâles formés au début du printemps (mars) tombent après l'émission de leur pollen en avril, alors que les cônes femelles gardent leur taille initiale jusqu'au printemps prochain (mars - avril) de la deuxième année où s'opère la fécondation puis ils continuent à se développer après la fécondation en augmentant de taille, continuent leur maturité et ne laissent échapper leurs graines qu'au cours de la troisième année (août - septembre). Quant à la pollinisation, elle est assurée essentiellement par le vent. Le pin d'Alep fructifie abondamment. Des études physiologiques menées par El Ouni (1980) ont montré qu'une majeure partie des substances nutritives est déviée vers les cônes au détriment d'autres parties de l'arbre (tige, rameaux, racines), ce qui laisserait penser que l'abondance de la fructification observée chez cette espèce pourrait être à l'origine de sa faible production ligneuse. Cependant, il a été montré (Khouja, 1993) que l'élimination de la fructification (suite à une ablation manuelle des cônelets dès leur apparition) chez de jeunes arbres de 3 ans n'affecte pas significativement leur croissance en hauteur.

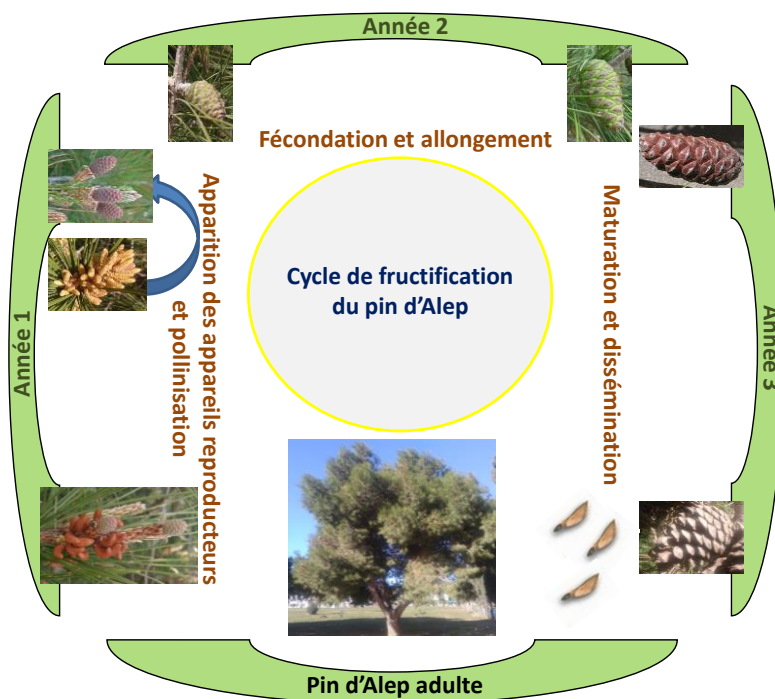


Figure 5: Cycle de fructification du pin d'Alep (conception Mariem Khouja).

Par ailleurs, la production des graines est fortement influencée par les conditions climatiques, si elle est très abondante pendant les années pluvieuses, elle est plutôt réduite pendant les années sèches. Aussi, des perturbations saisonnières peuvent occasionner des troubles de fructification et peuvent déclencher l'apparition précoce des cônelets et leur formation avant terme (Khouja, 1997). Naturellement, ces cônelets ne sont pas viables et finissent par dégénérer faute de pollinisation. Par ailleurs, la production des graines dépend étroitement des conditions pédoclimatiques du milieu, elle varie fortement selon les forêts et à l'intérieur même d'une même forêt (Sghaier *et al.*, 1995 ; Ayari *et al.*, 2011 ; Ayari, 2012 ; Ayari *et al.*, 2012 ; Ayari *et al.*, 2014). Selon Sghaier *et al.* (1995), la production en cônes et en graines dans la forêt de Ouergha (Nord-Ouest de la Tunisie - bioclimat subhumide) varie du simple au double en fonction des placettes d'échantillonnage. Cette production oscille entre 259 et 556 kg à l'hectare pour les cônes et entre 5 et 11 kg pour les graines, ce qui correspond à

un rendement en graines (rapport poids des graines poids des cônes) de l'ordre de 1,9 à 2,5%. On peut remarquer qu'on est très loin du chiffre donné par Boudy (1950) : 5 kg de graines pour 100 kg de cônes.

Conclusion

En Tunisie, le pin d'Alep occupe une place prépondérante dans le paysage forestier. Le pin d'Alep se remarque nettement par sa silhouette, son port, son teint et par l'importance de sa production fruitière. C'est l'espèce dominante à l'état naturel et aussi la première espèce de choix dans les reboisements. Sa rusticité et sa plasticité sont remarquables, il est omni présent dans une gamme très large de conditions pédoclimatiques du nord au sud du pays.

Toutes les particularités écologiques du pin d'Alep précisées dans ce chapitre apportent une preuve irréfutable quant à sa valeur forestière et climacique et quant à son rôle dans la pérennité de la forêt et dans l'équilibre de l'environnement en Tunisie et par extension en région méditerranéenne. Mis à part son rôle écologique, le pin d'Alep offre une multitude de biens et services, son rôle socioéconomique est de ce fait indéniable.

Le regain d'intérêt et l'expansion du pin d'Alep à grande échelle ont été surtout motivés par ses qualités intrinsèques et ses avantages forestiers, qu'on peut résumer ainsi :

- Sa fructification précoce et abondante.
- Son dynamisme.
- Ses faibles exigences et sa capacité à pousser dans des conditions des plus difficiles.
- Sa réponse favorable aux opérations culturales.
- Les possibilités de son utilisation à des fins multiples : reforestation des milieux dégradés, fixation du sol, production du bois, production de graines comestibles, extraction des huiles essentielles (à partir des feuilles) et des huiles végétales (à partir graines), etc.

Références bibliographiques

- Akrimi N., 1984 - Relations entre production et sols dans la pineraie de Sakiet Sidi Youcef (Tunisie septentrionale). Thèse de doctorat ès sciences. Univ. Droit. Eco. d'Aix Marseille : 179 p .
- Akrimi N., 1985 - Production des peuplements du pin d'Alep dans la région de Sakiet Sidi Youcef en fonction des conditions du milieu. Séminaire CIHEAM - Tunisie , 15-21 avril 1985 : 35 p .
- Ayari A, Moya D, Rejeb MN, Ben Mansoura A, Albouchi A, De Las Heras J, Fezzani T, Hanchi B. 2011 - Geographical variation on cone and seed production of natural *Pinus halepensis* Mill. forests in Tunisia. *J Arid Environ* 75:403–410.
- Ayari A, Zubizarreta GA, Tomé M, Tomé J, Garchi S, Henchi B., 2012 - Stand, tree and crown variables affecting cone crop and seed yield of Aleppo pine forests in different bioclimatic regions of Tunisia. *For Syst* 21:128–140.
- Ayari A., 2012 - Influence des différents facteurs environnementaux sur la fructification du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. Thèse de Doctorat en Sciences Biologiques. Faculté des Sciences de Tunis, 230p.
- Ayari A., Khouja M L., 2014 - Ecophysiological variables influencing Aleppo pine seed and cone production: A review. *Tree Physiology*, 34: 426-437.
- Baradat Ph., Lambardi M. et Michelozzi M., 1989 - Terpene composition in four Italian provenances of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.). *Journ. Genet. & Breed.*, 43 : 195-200.
- Baradat Ph., Michelozzi M., Tognetti R., Khouja M.L. et Khaldi A., 1995 - Geographical variation in the terpene composition of *Pinus halepensis* Mill. Population genetics and genetic conservation of forest trees. Academic Publishing, Amsterdam, The Netherlands : 141-158.
- Bariteau M., 1992 - Variabilité géographique et adaptation aux contraintes du milieu méditerranéen des pins de la section *Halepensis* : résultats (provisoires) d'un essai en plantations comparatives en France. *Ann. Sci. Forest.*, 49 : 261-276.
- Bellefontaine R. et Raggabi M., 1977 - Contribution à l'étude des Pins de la section *Halepensis* (*P. brutia* Ten. *P. eldarica* Medew. *P. halepensis* Mill.) au Maroc : considérations générales et essai international de provenances. *Ann. Rech. Forest. du Maroc*, 17 : 191-234.
- Bellefontaine R., 1979 - Variation morphologique des fleurs d'un *Pinus halepensis* Mill. *Ann. Rech. Forest. du Maroc*, 19 : 417-425.
- Biju-Duval B., Dercourt J. et Lepichon, 1976 - La genèse de la Méditerranée. *La Recherche*, 71 : 811-822.
- Boudy P., 1950 - Economie Forestière Nord - Africaine. Ed. Larose, Paris.
- Braban L., 1886 - Notes de voyage en Tunisie. *Rev. Eaux et Forêts* : 289-307.
- Calamassi R., 1986 - Caractérisation de quelques provenances de *Pinus halepensis* Mill. sur la base de la structure anatomique et morphologique des aiguilles. *Ann. Sci. Forest.*, 43(3) : 281-298.
- Debazac E.F. et Tomassone R., 1965 - Contributions à l'étude comparée des pins méditerranéens de la section *Halepensis*. *Ann. Sci. Forest.*, 22 (2) : 213-256.

- DGF, 2010 – Inventaire forestier et pastoral de la Tunisie (IFPN).
- Eccher A., Fusaro H. et Pelleri F., 1987 - Résultats de l'expérimentation italienne sur les principales provenances de pins de la section *Halepensis* : Dix ans après. Forêt méditerranéenne, T.IX (1) : 5-14.
- EL Aouni M., 1980 - Processus déterminant la production du pin d'Alep. Photosynthèse, croissance et répartition des assimilats. Thèse, Université de Paris VI : 164 p.
- Elaïeb M. T., Kachouri H., Azzouz S., Shel F., Khouja ML, et Candelier K., 2019 - Le bois du pin d'Alep Tunisien : propriétés, potentialités et débouchés. Chapitre 14 de l'ouvrage : Le pin d'Alep en Tunisie: Ecologie, Gestion et Usages, édité par Khouja ML, INRGREF. 292 - 273.
- EL Hamrouni A., 1978 - Etude phyto-écologique et problèmes d'utilisation et d'aménagement des forêts de pin d'Alep de la région de Kasserine (Tunisie Centrale). Thèse Docteur Ingénieur de la Faculté des Sciences et Techniques de Saint Jérôme-Aix Marseille III : 106 p.
- El Hamrouni A., El Hamrouni-Aschi K., El Khorchani A. et Mechergui R., 2019 - Parcours et troupeaux dans l'aire du pin d'Alep. Chapitre 13 de l'ouvrage : Le pin d'Alep en Tunisie: Ecologie, Gestion et Usages, édité par Khouja ML, INRGREF. 292 - 247.
- Falusi M. et Calamassi R., 1983 - Sensibility of seed germination and seedling root growth to moisture stress in four provenances of *Pinus halepensis* Mill. *Silvae Genetica*, 32 (1-2) : 4-9.
- Gaussen H., 1960 - Les Gymnospermes actuelles et fossiles (généralités sur le Genre *Pinus*) Fasc. VI, chap XI : 1-272.
- Grunwald C. et Schiller G., 1988 - Needle xylem water potentiel and water saturation deficit in provenances of *Pinus halepensis* Mill. and *P. brutia* Ten. Forêt méditerranéenne, T.X (2) : 407-414.
- Khouja, ML., 1993 - Influence de l'enlèvement des cônes sur la croissance en hauteur du pin d'Alep. Note de recherches de l'Institut National de Recherches Forestières de Tunisie : 15 p (diffusion restreinte).
- Khouja, ML., 1997 - Variabilité géographique du pin d'Alep en Tunisie : perspectives d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois. Thèse en vue d'obtention du diplôme de doctorat en sciences agronomique et Ingénierie biologique. Université Catholique de Louvain, 181p.
- Khouja M. L., Sghaïer T., 2000 – Variabilité intra spécifique du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et possibilités de sélection à un stade précoce. *Annales de l'INRGREF*, 4, p183-198.
- Khouja M. L., Sghaïer T., Nouri M. et André P., 2000 – Variabilité morphométrique du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et perspectives d'amélioration génétique. *Annales de l'INRGREF*, 4, p78-118.
- Khouja M. L., 2001a - Variabilité de la densité du bois estimée par pénétrométrie (pilodyn) chez le pin d'Alep. *Annales de la recherche forestière au Maroc*. T. **34**, pp. 48-64
- Khouja M. L., 2001b - Amélioration génétique : inventaire et bilan des recherches entreprises en Tunisie. *Annales de l'INRGREF* n°5 (numéro spécial). pp. 1 – 44.
- Khouja M.L., Boughecha Belkhodja K. et Zid E., 2006 - Germination de provenances de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en condition de stress osmotique, 2006. *Annales de l'INRGREF*, 9, Numéro spécial, p1-17.

- Khouja M., 2016 - Analyse quantitative et qualitative des extraits de certaines populations de pins Tunisiens : Comparaison inter et intra-spécifique. Mémoire en vue d'obtention de Master de recherche en Gestion des écosystèmes naturels et valorisation de leurs ressources. Institut National Agronomique De Tunisie. 55p.
- Marion J. et Poupon J., 1974 - Manuel pratique de reboisement. Rapport technique n°2 . F.A.O. SF/TUN 11 : 345 p.
- Martinez P., 1993 - Modélisation de la croissance et de l'architecture du pin d'Alep à l'âge de 35 ans. DEA-Diplôme d'Ingénieur Forestier : 38 p.
- Mirko V., 1991 - Conifers, morphology and variation : 755 p.
- Mirov N.T., 1967 - The genus *Pinus*. Ronald Press Company. New-York.
- Mouloupoulos C. et Bassiotis C., 1961 - Artificial Hybrids of *Pinus halepensis* and *Pinus brutia*. Annals of the Agricultural and Forestry Faculty, Aristoteleion Universite Salonica : 161-179.
- Nahal I., 1962 - Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Etude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole. Ann. de l'Ecole Nat. des Eaux et Forêts de Nancy, T.XIX (4) : 208 p.
- Palmberg G., 1975 - Geographic variation and early growth in south-eastern semi arid Australia of *Pinus halepensis* Mill. and the *Pinus brutia* Ten. species complex. *Silvae Genetica*, 24 (5-6) : 150-160.
- Panestsos K.P., 1975 - Natural hybridization between *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Greece. *Silvae Genetica*, 24 (5-6) : 163-168.
- Poupon J., 1970 - Etude de la croissance chez quelques espèces résineuses et feuillues à Zerniza. Note technique de l'Institut National de Recherches Forestières de Tunisie : 32 p.
- Quezel P., 1985 - Les pins du groupe «*Halepensis*». Ecologie, végétation, écophysologie. Séminaire sur le pin d'Alep et le pin brutia dans la sylviculture méditerranéenne. CIHEAM : 17 p.
- Serre F., 1976 - Les rapports de la croissance et du climat chez le pin d'Alep. *Acta Oecologiae Plantarum*, T.11 (2) : 143-171.
- Serre F., 1992 - Les enseignements écologiques de la variation de l'épaisseur du cerne chez le pin d'Alep. *Forêt méditerranéenne* T.XIII (3) : 171-177.
- Sghaier T., Khaldi A., Khouja M.L. et Nsibi R., 1995 - Estimation du rendement en cônes et en graines du pin d'Alep de la forêt de Ouergha de Sakiet Sidi Youssef. Note INRGREF : 5 p.
- Soulères G., 1975 - Classes de fertilité et production des forêts tunisiennes de pin d'Alep. *Rev. Forest. Franç.*, T.XXVII (1) : 41-49.
- Spencer D.J., 1985 - Dry country pines : provenance evaluation of the *Pinus halepensis* - *Pinus brutia* complex in the semi arid region of South - east Australia. *Aust. For. Res.*, 15 : 264-279.
- Thibault B., Loup C., Chanson B. et Dilem A., 1992 - La valorisation du pin d'Alep en zone méditerranéenne française. *Forêt méditerranéenne*, T.XIII (3) : 226-234.

CHAPITRE 2

Variabilité et amélioration génétique du pin d'Alep

Mohamed Larbi Khouja¹, Mariem Khouja¹, Tarek Fezzani¹, Abdelaziz Ayari¹,
Kaouther Mechergui^{1,2}, Wahbi Jaouadi^{1,2}, Adel Abada¹
et Boujomaa Ben Mabrouk¹

¹Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts.
BP. 10. Rue Hédi Karray. Ariana 2080.

²Institut Sylvo-Pastoral de Tabarka. 8110 Tabarka. Tunisie
Université de Carthage, Tunisie

Email: khouja.larbi15@gmail.com

Résumé. Ce chapitre s'intéresse aux travaux d'amélioration génétique du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) entrepris en Tunisie. Il retrace l'historique du programme de recherche sur la variabilité intraspécifique de l'espèce, son évolution et ses orientations en relation avec les besoins de la recherche et du développement. Il dresse une liste du matériel génétique testé, ayant servi pour les différents essais réalisés au laboratoire, en pépinière et au champ. Il restitue les principaux résultats ayant trait à la valeur adaptative et productive des provenances. Ces résultats, d'intérêt pratique, concernent plusieurs aspects à savoir : la survie, la croissance et la forme des arbres, les propriétés physiques du bois, le comportement physiologique, la production en cônes et en graines, la tolérance à l'attaque de la chenille processionnaire, le rendement et la bio-activité des extraits naturels. Il reprend aussi certains résultats fondamentaux concernant :

- les lois de variabilité de l'espèce à l'échelle de sa répartition en Tunisie en relation avec les principaux facteurs géographiques ;
- la valeur des principaux paramètres génétiques tels que : l'héritabilité, le gain génétique, la corrélation génétique etc. ;
- la stabilité phénotypique des provenances, basée sur des approches statistiques d'estimation de l'interaction génotype*milieu.

Le chapitre finit par dresser la liste des provenances les plus performantes à recommander pour le reboisement et à impliquer comme population de base dans un programme d'amélioration. Ce programme, conçu sur le moyen et le long terme, devrait permettre des sorties variétales de plus en plus performantes et la création de nouveaux reboisements de plus en plus productifs et de meilleure qualité forestière.

Mots-clés : pin d'Alep, *Pinus halepensis*, variabilité, provenance, amélioration génétique, Tunisie.

Abstract. Genetic improvement and variability of Aleppo pine. This chapter focuses on the genetic improvement of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) carried out in Tunisia. It traces the research program history of the species intraspecific variability, its evolution and orientations related to research and development needs. It records the various

genetic material tested and used in laboratory, nursery and field trials. It reviews the foremost results describing the adaptive and the productive value of provenances. These results have numerous practical interests concerning several aspects including survival rate, growth and Aleppo pine trees shape, wood physical properties, physiological behaviour, cone and seed production, tolerance to the attack by processional caterpillar, yield and biological activities of natural extracts. Likewise, it also includes some fundamental results concerning:

- The species variability laws within its natural forest area in Tunisia relating main geographical factors.
- Values of the most important genetic parameters such as: heritability, genetic gain, genetic correlation, etc.
- Phenotypic stability of provenances based on statistical approaches to assess the interaction genotype*environment.

Finally, the chapter concludes via listing overriding Aleppo pine provenances recommended for reforestation and involving basic population as an improvement program. This approach designed in a medium- and long-term program should allow to varieties outputs which will be used for the establishment of more productive and better quality forest tree plantations.

Keywords: Aleppo pine, *Pinus halepensis*, variability, provenances, genetic improvement, Tunisia.

1. Historique et évolution des recherches en matière de variabilité génétique du pin d'Alep en Tunisie

En Tunisie, les recherches forestières orientées vers d'exploration génétique ont été réalisées en suivant deux approches complémentaires menées soit consécutivement soit simultanément. Ces deux approches ont conduit à la mise en place à partir des années soixante d'un réseau d'arboretums (ou arboreta) avec un nombre important d'espèces (plus de 200 espèces autochtones et allochtones) et l'installation d'une série de plantations comparatives de provenances d'espèces pré-choisies sur la base de leur intérêt forestier et économique dont le pin d'Alep. L'objectif de ces plantations expérimentales est d'exploiter d'une manière optimale la variabilité inter et intra-spécifique devant aboutir à la sélection des espèces/provenances les plus performantes et les mieux adaptées au milieu pour les besoins de reboisement.

Dans ce contexte général, le programme de recherche sur la variabilité éco-génétique du pin d'Alep est passé par des étapes bien distinctes : au départ, il a été initié par A. Francllet, ancien chercheur à l'Institut de Reboisement de Tunis

(IRT) en 1964, il a connu, par la suite, une longue interruption avant d'être réactivé par l'intermédiaire d'une évaluation des essais de provenances par M. L. Khouja, dans le cadre d'un DEA en 1985 (Khouja, 1985), puis dans le cadre d'une thèse de Doctorat en 1997 (Khouja, 1997). Aussi, grâce à l'apport de la coopération bilatérale avec l'INRA de Bordeaux - France en 1989, ce programme a connu des développements conséquents et plus harmonieux ce qui a permis de jeter les jalons d'un programme d'amélioration spécifique à partir des provenances sélectionnées dans les essais les plus anciens.

D'une manière concomitante, le réseau expérimental initié en 1964 s'est enrichi au fur et à mesure par la mise en place de nouveaux essais échelonnés sur plusieurs dates (1968, 1997). Le plus ancien essai, celui de 1964, comprend 7 plantations comparatives d'une quarantaine de provenances, ce qui constituait déjà le plus important dispositif installé en région méditerranéenne. En 1969, un second essai comprenant 49 provenances de pins du groupe « *Halepensis* » a été mis en place à Oum Jedour (région de Kasserine – Tunisie Centrale) et à Saouania (région de Tabarka – Nord de la Tunisie). Pour différentes raisons (relève des chercheurs non assurée, manque de moyens et de personnel technique), ces essais ont été longtemps délaissés et certains d'entre eux ont été partiellement ou fortement endommagés. De ce fait, sur les sept initialement installés, seulement quatre sites, les mieux préservés, ont pu être exploités. Depuis 1997, et profitant des moyens du projet INCO-FORADAPT, le réseau expérimental a été renforcé par la mise en place de 4 nouveaux sites expérimentaux de provenances de pin d'Alep et de pin brutia. Pour ces derniers essais, les objectifs de sélection se sont orientés préférentiellement vers la recherche d'écotypes plus tolérants à la sécheresse en prévision des changements climatiques (en comparaison avec des essais similaires installés dans les pays associés au projet (France, Italie, Turquie, Maroc, Algérie).

Pour une meilleure clarté dans la présentation des recherches entreprises sur la variabilité intra-spécifique du pin d'Alep dans les plantations comparatives, nous présenterons les essais par ordre chronologique. Ces essais coïncident avec trois dates principales de mise en place : 1964, 1968 pour les plus anciens

et 1997 pour les plus récents. Un bon nombre de ces essais a fait l'objet de plusieurs publications dont les plus importantes : (Khouja, 1985 ; 1993 ; 1997 ; 2001a ; 2001b ; Khouja et Sghaier, 2000 ; Khouja *et al.*, 2000 ; 2006 ; Khouja, 2016 ; Ayari *et al.*, 2016.

2. Quel intérêt y a-t-il à améliorer le pin d'Alep ?

Si de fait le pin d'Alep est reconnu intrinsèquement comme espèce peu productive en bois et de qualité médiocre (surtout à cause de la mauvaise rectitude de son tronc et de la grosseur de ses branches), les séquelles d'un lourd passé de vicissitudes résultant d'une forte pression humaine et d'une exploitation poussée à l'extrême ont incontestablement beaucoup aggravé ces anomalies. Les différents écrits relatés par Khouja (1997) apportent un témoignage sur l'évolution régressive qu'a connu le pin d'Alep au cours de son histoire et dont les conséquences sont nettement visibles sur la plupart des forêts de pin d'Alep qu'on rencontre actuellement. Evidemment, cette évolution (sélection négative) n'est pas sans conséquences sur la qualité génétique de l'espèce. En effet, les facteurs de dégradation ont eu des répercussions néfastes sur le pin d'Alep tunisien puisqu'ils ont entraîné l'anéantissement ou l'appauvrissement génétique de nombreuses populations notamment celles se trouvant en périphérie ou en marge de l'aire de répartition centrale. En disposant dès le départ d'un matériel génétique peu performant, la tâche de l'améliorateur devient plus difficile quant au choix des populations qu'il doit intégrer comme populations candidates dans un programme d'amélioration génétique. Cependant, malgré ce handicap, les nombreuses qualités intrinsèques de l'espèce, constituent quand même des atouts incontestables pour apporter des réponses avantageuses et rapides à l'amélioration, à savoir :

- Une vaste aire de répartition géographique qui laisse présager une importante variabilité génétique et prédire par conséquent des gains génétiques appréciables suite à la sélection des meilleurs écotypes ;

- Une fructification précoce et abondante (les cycles d'amélioration relativement courts, par conséquent, une entrée en production des graines améliorées rapide) ;
- Des qualités de bois comparables à un bon nombre d'autres pins (notamment à celles du pin maritime) jugées dans l'ensemble acceptables pour des usages industriels variés.

Par ailleurs, si l'on sait d'après plusieurs auteurs (Bouvarel, 1974 ; Roman-Amat, 1986 ; Steinmetz, 1986) que le gain génétique obtenu par voie de sélection des meilleures provenances est le plus avantageux, on conçoit plus aisément qu'une exploration de la variabilité géographique d'une espèce forestière doit constituer un passage obligatoire et une phase importante dans un programme d'amélioration génétique. En plus de l'identification de la population de base pour la suite du processus d'amélioration, les résultats qui en découlent devraient répondre à un besoin immédiat et d'intérêt pratique consistant à orienter les forestiers vers un meilleur choix des sources de graines pour le reboisement.

A l'échelle expérimentale, l'étude du comportement des provenances dans des essais multisites constitue un outil incontournable et un moyen efficace pour estimer l'importance de la variabilité intra-spécifique d'une espèce forestière et évaluer ses potentialités génétiques.

Pour le choix des provenances de pin d'Alep, on s'est orienté, dans un premier temps, vers des caractères d'adaptation au milieu (survie) et de croissance (hauteur, diamètre). Par la suite, en tenant surtout compte des exigences économiques et des changements climatiques prévisibles dans le contexte méditerranéen, la sélection s'est attachée à d'autres critères d'ordre qualitatif et adaptatif, d'intérêt économique et environnemental tels que des paramètres morphologiques (forme des arbres), physiques de bois (densité), physiologiques (stress osmotique, photosynthèse, conductance stomatique,...), phyto-chimique (huiles essentielles, huile végétale, activités biologiques),

entomologique (tolérance à la chenille processionnaire), production des graines (quantité, qualité).

Aussi, en plus des caractères intrinsèques des provenances, on a accordé beaucoup d'importance aux critères de l'interaction génotype-milieu et de corrélation génétique entre paramètres de sélection. Ces aspects sont d'une grande utilité dans le choix des provenances soit pour les besoins de reboisement soit pour l'identification de la population de base dans un programme d'amélioration.

3. Variabilité intra-spécifique et valeur adaptative et productive du pin d'Alep

3.1 Matériel génétique

Le matériel génétique est constitué de semences locales et introduites d'origine géographique différente. Ce matériel génétique a servi pour l'installation des différents essais réalisés en Tunisie coïncidant avec trois dates principales à savoir : 1964, 1968 et 1997. Le matériel génétique utilisé en 1964 est constitué de 41 provenances comprenant 30 tunisiennes, 7 marocaines, 3 italiennes et 1 palestinienne. (Tableau 1).

Tableau 1: Liste des provenances de pin d'Alep (A-AO) expérimentées dans les plantations comparatives mises en place en 1964.

N°	Provenance Pays d'origine	Code	N°	Provenance Pays d'origine	Code
1	Affra - Maroc	A	22	Dernaïa – Tunisie	V
2	Ait Tamelli I - Maroc	B	23	Sodga - Tunisie	W
3	Sgate - Maroc	C	24	Takrouna II	X
4	Tanmizdite - Maroc	D	25	Mellègue - Tunisie	Y
5	Tillouguite - Maroc	E	26	Jebel Koumine - Tunisie	Z
6	Oued Tessaoute	F	27	Mejez El Bab - Tunisie	AA
7	Aknoul - Maroc	G	28	Ouesselatia Sud - Tunisie	AB
8	Sakiet - Tunisie	H	29	Ouergha - Tunisie	AC
9	Takrouna I - Tunisie	I	30	Marchana - Tunisie	AD
10	Jebel Korbous - Tunisie	J	31	Jebel Zaghouan - Tunisie	AE
11	J. Abderrahman - Tunisie	K	32	Oum Jedour - Tunisie	AF
12	Ain Zeres - Tunisie	L	33	Selloum - Tunisie	AG
13	Mine de Serj - Tunisie	M	34	M'Guila - Tunisie	AH
14	Kessera - Tunisie	N	35	Fernana - Tunisie	AI
15	Oued El Bir - Tunisie	O	36	Otricoli - Italie	AJ
16	Segermes - Tunisie	P	37	Gargano- Italie	AK
17	Semama - Tunisie	Q	38	Patemisco- Italie	AL
18	Berino - Tunisie	R	39	Jérusalem - Palestine	AM
19	Chambi - Tunisie	S	40	Bizerte - Tunisie	AN
20	Saïdane - Tunisie	T	41	Chambi – Tunisie	AO
21	Jebel Chéhid - Tunisie	U			

Le matériel génétique utilisé en 1968 est constitué de 49 provenances de 3 espèces du groupe *Halepensis* (pin d'Alep, pin brutia et pin d'Eldar) dont la répartition est la suivante :

- Pin d'Alep [*Pinus halepensis* (*Ph*)] : 39 provenances : 1 libanaise, 1 palestinienne (Jérusalem), 1 marocaine, 1 yougoslave, 4 algériennes et 31 tunisiennes.
- Pin brutia [*Pinus brutia* (*Pb*)] : 8 provenances : 6 turques et 2 libanaises.
- Pin d'Eldar [*Pinus eldarica* (*Pe*)] : 2 provenances iraniennes (Tableau 2).

Quant au matériel génétique testé dans les essais réalisés en 1997, il est constitué de 20 provenances (Tableau 3) réparties entre 7 pays : 8 tunisiennes, 3 marocaines, 2 palestiniennes, 2 italiennes, 2 espagnoles, 2 grecques et 1 française.

Tableau 2: Liste des provenances (Prov.) de pin d'Alep (*Ph*), pin brutia (*Pb*) et pin d'Eldar (*Pe*) expérimentées dans les plantations comparatives mises en place en Tunisie en 1968.

N°	Prov. – Pays d'origine	Code	N°	Prov. – Pays d'origine	Code
1	Jerusalem1 - Palestine	Ph1	26	Chambi 1 – Tun.	Ph26
2	Jerusalem2 - Palestine	Ph2	27	Chambi 2 - Tun.	Ph27
3	J. Abderrahmane - Tun.	Ph3	28	Chambi 3 - Tun.	Ph28
4	F. 64-374 Irhir - Maroc	Ph4	29	Chambi 4 - Tun.	Ph29
5	Fernana (a) - Tun.	Ph5	30	Dernaia 1 - Tun.	Ph30
6	Fernana (b) - Tun.	Ph6	31	Dernaia 2 - Tun.	Ph31
7	Porto Farina - Tun.	Ph7	32	Sif El Anba 1 - Tun.	Ph32
8	Kessera (près Gorrâa) – Tun.	Ph8	33	Sif El Anba 2 - Tun.	Ph33
9	Bou Medien –Alg.	Ph9	34	Sabaa Diar - Tun.	Ph34
10	Djefa F.D. Senalba Est – Alg.	Ph10	35	Sakiet - Tun.	Ph35
11	Djefa F.D. Senalba Est – Alg.	Ph11	36	Khechem El Kelb - Tun.	Ph36
12	Ain Blida (environs) – Alg.	Ph12	37	Ain florina - Tun.	Ph37
13	Tebessa (Dj. Mestiri) – Alg.	Ph13	38	Localité inconnue - Liban	Ph38
14	Tebessa (Dj. Mestiri) – Alg.	Ph14	39	Localité inconnue - Liban	Pb1
15	Ustanovaza -Yougoslavie	Ph15	40	Ankara - Turquie	Pb2
16	Ain Boudries – Tun.	Ph16	41	Ankara - Turquie	Pb3
17	Chambi bas trou 29 - Tun.	Ph17	42	Localité inconnue - Liban	Pb4
18	Korbous - Tun.	Ph18	43	Burdur - Turquie	Pb5
19	Oum Djedour I. 13 – Tun.	Ph19	44	(P. N°527) - Turquie	Pb6
20	Selloum sud-bas – Tun.	Ph20	45	(P. N°529) - Turquie	Pb7
21	Selloum sud - Tun.	Ph21	46	(P. N°458) - Turquie	Pb8
22	Selloum sud 1 38 - Tun.	Ph22	47	Teheran Rus J. - Iran	Pe1
23	Selloum sud T 39 - Tun.	Ph23	48	Nord d'Iran - Iran	Pe2
24	Selloum sud T 39 - Tun.	Ph24	49	Nord d'Iran – Iran	Pe3
25	Chambi 1ère Stat. - Tun.	Ph25			

Tun. : Tunisie ; Alg. : Algérie

Tableau 3: Liste des provenances de pin d'Alep (P1-P20) expérimentées dans les plantations comparatives mises en place en 1997.

N°	Provenance Pays d'origine	Code	N°	Provenance Pays d'origine	Code
1	Selloum - Tunisie	P1	11	Toscana 57 – Italie	P11
2	Oum Jedour – Tunisie	P2	12	Toscana 60 - Italie	P12
3	Mellègue - Tunisie	P3	13	Yiska - Palestine	P13
4	Jbel Chéhid - Tunisie	P4	14	Tamga - Maroc	P14
5	Oueslatia – Tunisie	P5	15	Ikherifène – Maroc	P15
6	Caireval - France	P6	16	Kassandra - Grèce	P16
7	Nortj Euboia – Grèce	P7	17	Valez Blanco - Espagne	P17
8	Jarafuel A20 - Espagne	P8	18	Berino - Tunisie	P18
9	Mont Carmel – Palestine	P9	19	M'Guila - Tunisie	P19
10	Lalla Mimouna - Maroc	P10	20	Takrouna – Tunisie	P20

3.2 Caractérisation et variabilité morphologique du matériel génétique de départ

Pour la caractérisation du matériel expérimental de 1964, trois critères ont été considérés : la taille et le poids des cônes, le poids de 1000 graines, le nombre des cotylédons et leur longueur après germination.

Les cônes sont caractérisés par une longueur moyenne de 6,5 cm, une largeur moyenne de 2,9 cm et un poids moyen de 21,3 g. Ces valeurs moyennes varient fortement avec la provenance : de 5,6 cm à 7,6cm pour la longueur, 2,6 cm à 3,8 cm pour la largeur et de 15,4 g à 37 g pour le poids des cônes. En ce qui concerne les graines, le poids moyen de 1000 graines est de 1,7 g et varie fortement selon les provenances de 1,1 g (Jbel Korbous) à 2,6 g (Chambi).

Après germination, les cotylédons émis varient en nombre et en longueur en fonction de la provenance. Le nombre des cotylédons chez les plantules est réparti en 8 classes constituées chacune de 3 à 10 cotylédons. C'est la classe 5 cotylédons qui est la plus fréquente (187 plantules sur un total de 790). Quant à la longueur des cotylédons, elle est en moyenne de 2,1 cm et varie de 1,7 cm (Mine de Serj) à 2,5 cm (Fernana).

Pour les graines utilisées dans les essais de 1997, le poids moyen de 1000 graines est de 2 g et varie fortement selon les provenances de 1,6 g (Jarafuel - Espagne) à 3,3 g (Tagma - Maroc). On peut remarquer que le poids moyen des graines de 1997 (2 g) est supérieur à celui enregistré en 1964 (1,7 g). Tous les caractères juvéniles étudiés discriminent nettement les provenances. D'après Nanson (1968a), le poids de 1000 graines constitue un test précoce de valeur prédictive « moyenne » à « bonne » et peut être pris comme critère de sélection à un stade précoce.

3.3 Comportement juvénile en pépinière

L'étude du comportement en pépinière a concerné les provenances de pin d'Alep testées en 1964 et en 1997. Les mesures ont porté sur la hauteur des

plants respectivement à l'âge de 6 et 8 mois après le semis. La hauteur totale des plants est de 15,5 cm chez les provenances testées en 1963, variant de 10,6 cm (Oueslatia) à 17,3 cm (Fernana et Selloum) tandis qu'elle est de 17,2 cm chez les provenances testées en 1997, variant de 13,4 cm à 20 cm, respectivement pour la provenance la moins vigoureuse (Carieval – France) et la provenance la plus vigoureuse (Takrouna – Tunisie).

3.4 Comportement adaptatif et évaluation morphométrique en plantation comparative

3.4.1 Evaluation des essais de 1964

Le premier essai de 1964 est un essai multisite installé dans 4 sites à savoir : Souiniet, Korbous, Jbel Abderrahman et Henchir Naâm aux conditions géographiques et pédoclimatiques contrastées (Tableau 4).

Tableau 4 : Description des sites expérimentaux (conditions géographiques et pédo-climatiques).

Caractéristiques	Site expérimental			
	Souiniet	Korbous	J. Abderrahman	H. Naam
Latitude (degré)	36°54'	36°50'	36°40'	36°13'
Longitude (degré)	8°48'	10°35'	10°40'	9°10'
Altitude(m)	492	180	255	450
Pluviométrie Moy.(mm)	1140	540	600	524
Pluviométrie Max.(mm)	1606	-	-	955
Pluviométrie Min.(mm)	691	-	-	309
Température Moy.(°C)	15,6	18,2	18	16,3
Température Max.(°C)	31,0	32,7	32,4	34,0
Température Min.(°C)	4,4	6,8	7,9	3,3
Neige (j)	7	0	0	5
Q	142	82	90	58
Bioclimat	H Inf.	SH	SH	SA Moy.
Substrat	Grès	Calcaire	Grès	M-Calcaire

Q : Quotient ombrothermique d'Emberger, j : jours, SH : Sub-humide, SA : Semi-aride, M-Calcaire : Marno-calcaire

Le dispositif expérimental adopté est conçu en blocs aléatoires complets mono arbre.

Des mesures successives étalées sur 36 ans de 1967 à 2000 ont concerné des paramètres relatifs à l'adaptation au milieu (taux de survie), à la croissance (hauteur, circonférence et diamètre des arbres), à la forme générale des arbres

évaluée à partir de 6 caractères affectant la rectitude et la branchaison et à la densité du bois à l'aide de mesure directe (volumétre) et indirecte par pénétrométrie sur et sous écorce (pilodyn) (Khouja, 1997 ; 1985).

Pour différentes raisons, les mesures effectuées étaient discontinues et variables d'un site à un autre de sorte qu'on n'a pas ni le même nombre ni les mêmes années de mesures pour les sites expérimentaux. Concernant les paramètres mesurés, des valeurs élevées pour la hauteur, le diamètre et la forme signifient des performances élevées et vice-versa. Contrairement au pilodyn, plus les valeurs sont élevées, moins le bois est dense.

Les résultats concernant les caractères d'adaptation au milieu et de croissance, à savoir : la survie, la hauteur totale et le diamètre à 1,30 m ont mis en évidence l'existence d'une forte variabilité entre les provenances à l'âge de 29 ans et de 36 ans à partir de la plantation, aussi bien au niveau intrasite qu'au niveau intersites. La survie utilisée comme critère d'adaptation aux conditions pédo-climatiques du milieu montre un comportement adaptatif des provenances variable à l'intérieur d'un même site et entre différents sites expérimentaux.

A l'âge de 29 ans (comptage de 1993), la survie moyenne pour les 4 sites regroupés est de 90 % et varie, selon les sites, de 82 % à 98 %. A l'âge de 36 ans (comptage de 2000), la survie a été réduite à 76 % pour l'ensemble des sites atteignant son niveau le plus bas (61 %) à Jebel Abderrahman. Cette chute brutale du taux de survie peut être attribuée à la sécheresse prononcée qui a sévi au cours des deux années 1994 et 1995 (Khouja, 1997).

A l'échelle des provenances, avec un taux de survie moyen de 92 % à l'âge de 36 ans, Takrouna et Mellègue, ont été les moins affectées par la mortalité, contrairement à Gargano qui s'est montrée la plus vulnérable et la plus sensible à la sécheresse, avec un taux de survie moyen de 48 % pour l'ensemble des sites.

Sur le plan morphométrique, les tests de provenances ont mis en évidence le pouvoir discriminant de chacun des caractères étudiés et la forte variabilité entre provenances et sites expérimentaux. C'est dans les deux sites de Henchir Naam et de Jebel Abderrahman que les provenances se sont montrées les plus

performantes du point de vue croissance en hauteur et en diamètre et forme des arbres, contrairement au site de Souiniet où les conditions pédoclimatiques se sont révélées moins favorables malgré la bonne prestation de certaines provenances étrangères (marocaines et italiennes). Tous les travaux publiés sur ce thème s'accordent sur la présence d'une forte variabilité au sein du pin d'Alep pour les caractères de vigueur et de forme (Spencer, 1985 ; Panetsos, 1986 ; Eccher *et al.*, 1987 ; Bariteau, 1992). Nous remarquons aussi que la variabilité exprimée par les provenances est nettement plus forte pour les caractères de croissance que pour le caractère de forme, ce qui est en accord avec les constatations de Spencer (1985) pour le pin d'Alep et de Kremer (1986), Bouroulet (1994) et Harfouche (1995) pour d'autres espèces de pin.

En considérant tous les critères de sélection à la fois (survie, croissance et forme des arbres), c'est le site de Henchir Naam, caractérisé par un bioclimat semi aride, et reposant sur un substrat marno-calcaire, qui semble offrir les conditions optimales pour la culture du pin d'Alep. De telles conditions se traduisent par une meilleure adaptation au milieu, une meilleure croissance et une forme plus régulière et moins hétérogène.

3.4.2 Evaluation des essais de 1968

Dans le site expérimental d'Oum Jedour mis en place en 1968, les résultats de croissance en hauteur à l'âge de 32 ans (mesure réalisée en 2000) mettent en évidence un comportement significativement différent aux deux niveaux inter et intra-spécifique. Globalement, la hauteur moyenne, toutes espèces et provenances confondues, est de 271 cm oscillant entre 169 et 362 cm. Au niveau interspécifique, les provenances du pin d'Alep se sont montrées beaucoup plus performantes que celles du pin brutia ou du pin d'Eldar. Cette différence de comportement peut être attribuée aux conditions pédoclimatiques du site expérimental d'Oum Jedour qui sont marquées par une sécheresse accentuée et un taux de calcaire actif élevé. Si de telles conditions sont propices au pin d'Alep, elles semblent plutôt défavorables au pin brutia et au pin d'Eldar ; ces derniers

sont connus comme étant des espèces climatiquement plus exigeantes et peu tolérantes au calcaire actif. Au sein du pin d'Alep, la provenance algérienne de Aîn Blida avec une hauteur moyenne de 362 cm s'est nettement distinguée en se classant première devant les provenances tunisiennes de Aîn Boudries (329 cm), Selloum et Aîn Florina (325 cm).

3.4.3 Evaluation des essais de 1997

Les essais de 1997 ont concerné 5 sites expérimentaux à savoir : Souiniet, Melloula, Tebaba, Hanya et Jebel Abderrahmane dont les caractéristiques écologiques sont indiquées dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Caractéristiques écologiques (Latitude (Lat.), Longitude (Long.), Altitude (Alt.), Pluviométrie (Pluv.)) des sites expérimentaux de 1997.

Site expérimental	Caractéristiques écologiques				
	Lat. (Degré)	Long. (Degré)	Alt. (m)	Pluv. (mm)	Substrat
Souiniet	35°54'	8°48'	492	1140	Gréseux
Melloula	36°05'	8°46'	100	1044	Gréseux
Tebaba	36°58'	9°52'	250	850	Argileux-marneux
J. Abderrahman	36°45'	9°26'	100	600	Gréseux

Les essais ont été réalisés selon un dispositif statistique en blocs aléatoires complets. Les mesures ont porté sur la hauteur totale des plants et ont été réalisées à trois reprises : en 1999 juste après la plantation, en 2000 et en 2001. L'analyse de la variance relative aux mesures réalisées en 2001 (plants âgés de deux ans et demi) a permis de mettre en évidence des différences hautement à très hautement significatives entre les 20 provenances testées dans les sites de Jebel Abderrahman, Souiniet et Melloula, contrairement aux deux autres sites de Tebaba et Melloula où les provenances ne diffèrent pas significativement les unes des autres. La plupart des provenances se sont révélées instables et interactives avec les conditions du milieu. C'est le cas notamment de la provenance italienne Toscana 2, classée 1ère dans les deux sites de Jebel

Abderrahaman et de Tebaba, s'est retrouvée au milieu du classement à Melloula et Hanya et s'est contentée de la 11^{ème} place à Souiniet. Parmi les provenances les plus performantes, on peut retenir la provenance Toscana 2 d'Italie, celle de Kassandra de Grèce et de Mont Carmel de Palestine. De point de vue performance générale, ce sont les deux stations de Jebel Abderrahmane et Tebaba qui semblent offrir les conditions les plus favorables de croissance en hauteur avec une moyenne générale respectivement égale à 65 cm et 59 cm contrairement au site de Souiniet où la moyenne est de 31cm seulement.

3.5 Variabilité des qualités physiques du bois

L'évaluation de la qualité physique du bois, et plus précisément de la densité du bois, a été approchée par une estimation indirecte à l'aide de pilodyn. Conjointement, des mesures de densité (infradensité) sur carottes de sondage à l'aide de volumétre ont été réalisées sur un nombre limité de provenances dans un objectif de comparaison et de validation. L'usage du pilodyn pourrait être un moyen efficace pour discriminer les provenances et sélectionner celles qui présentent des valeurs de pilodyn les moins élevées (Khouja, 1997). De telles provenances offrent, normalement, un bois plus dense et sont par conséquent de meilleure qualité physique.

Pour les mesures de pilodyn, sur et sous écorce, des différences significatives ont été décelées entre les 30 provenances communes aux 3 sites expérimentaux de Henchir Naam, Korbous et Souiniet. Tout site confondu, la valeur moyenne de pilodyn sur écorce est de 16,8 mm et varie fortement du simple au double (de 13,6 mm pour Oueslatia dans le site de Henchir Naam à 26 mm pour Oum Jedour à Souiniet). Quant à la valeur moyenne sous écorce, elle est de 11,8 mm et varie beaucoup moins de 10,7 mm (Oueslatia à Korbous) à 12,9 mm (Selloum à Souiniet). En revanche, aucune différence au sens statistique entre provenances n'a été trouvée concernant l'infradensité (D_i) dont les valeurs moyennes varient entre 442 kg/m³ et 455 kg/m³, ce qui corrobore les

résultats obtenus par Polge et Keller (1970) ayant travaillé sur les mêmes provenances.

3.6 Variabilité de la tolérance à la chenille processionnaire

Le pin d'Alep est attaqué par de nombreux déprédateurs dont la chenille processionnaire (*Thaumatopea pithyocampa*). Les dégâts occasionnés par ce défoliateur sur la croissance des arbres sont très importants et préjudiciables. En effet, la perte de la croissance est de l'ordre de 30 à 40% en ce qui concerne la hauteur (Demolin et Rives, 1968) et de 20 à 35% en ce qui concerne le diamètre (Laurent-Hervouet, 1986). Le cycle biologique de la chenille processionnaire est bien connu (Demolin, 1968 ; Demolin et Rives, 1968 ; Ben Jamâa *et al.*, 2017). Sa pullulation est assez régulière dans le temps, mais sa prolifération semble être cyclique et atteint son maximum tous les 9 - 13 ans (Euverte, 1982).

La résistance à la chenille processionnaire est estimée par deux indices : Taux d'arbres attaqués (nombre d'arbres attaqués sur le nombre d'arbres total par provenance) et Intensité d'attaque (nombre de nids moyen par provenance). Les résultats obtenus lors de 2 campagnes d'observation réalisées en 1989 et en 1991 sur les 30 provenances communes aux deux sites de Henchir Naam et de Korbous, mis en place en 1964, ont permis de mettre en évidence un comportement variable entre provenances. Cependant, la variabilité observée semble être influencée par le double effet spatial et temporel. En effet, si les deux indices (taux d'arbres attaqués et intensité d'attaque) se maintiennent au même niveau dans le site de Henchir Naam pour les deux années d'observation 1989 et 1991, respectivement 65,7% et 69,6% comme taux d'attaque et 2,6 et 2,5 comme intensité d'attaque), ils sont du simple au double dans le 2^{ème} site de Korbous, pour les mêmes années d'observation (1989 et 1991), soit 83,6% et 45,7% pour le taux d'attaque et 2,3 et 1 pour l'intensité d'attaque.

La recherche des relations causales qui lient la chenille processionnaire aux différents paramètres pouvant expliquer son attraction et conditionner son action montre que l'insecte a une nette préférence pour les arbres les plus

vigoureux en termes de croissance en hauteur (Khouja, 1997 ; Sghaier *et al.*, 1999). Il est par conséquent difficile d'attribuer aux provenances les moins attaquées une forme de résistance d'origine génétique. D'après Demolin (1968), la chenille ne semble pas avoir de préférence particulière pour une espèce donnée, cependant, il peut y avoir une forme de résistance apparente quand les espèces se trouvent en mélange mais qui tend à disparaître dans le cas d'une plantation mono spécifique.

3.7 Variabilité de la production en cônes et en graines

L'étude comparée de la production en cônes et en graines a concerné 4 provenances tunisiennes de pin d'Alep (Oueslatia, Selloum, M'Guila et Takrouna) issues du site expérimental de Korbous installé en 1964. Elle a été réalisée sur 4 arbres adultes d'un même âge (53 ans) et de taille comparable (en moyenne 7,8 m de hauteur totale, 14 cm de diamètre et 3,8 m de diamètre du houppier).

Les branches prélevées sur les arbres échantillonnés, d'une longueur comparable (1,5 m), produisent en moyenne 36 cônes. Ce nombre varie notablement en fonction de la provenance et en fonction du type de cône (cônes ouverts, cônes sérotineux et nouveaux cônes mûrs). La sérotinie ou l'aptitude de garder des cônes fermés après maturation complète pendant de nombreuses années est une caractéristique spécifique du pin d'Alep. Au sein de chaque provenance, le nombre des cônes sérotineux est plus important que le nombre des cônes mûrs nouveaux (en moyenne 15 cônes sérotineux contre 8 cônes nouveaux). Le poids moyen des nouveaux cônes mûrs produits par arbre est de 63g et varie nettement selon la provenance de 19g à 84 g. Quant au poids moyen des cônes sérotineux, il est de 146 g et varie significativement avec la provenance de 91 g à 230 g. De nombreux auteurs (Sghaier *et al.*, 1997 ; Tapias *et al.*, 2001 ; Verkaik et Espelta, 2006 ; Moya *et al.*, 2008) ont constaté que le nombre moyen des cônes mûrs par arbre et leurs caractéristiques morphologiques varient en fonction de la provenance, de la qualité du site de plantation, de la densité du peuplement, de l'âge des arbres et des traitements

sylvicoles. A ce titre, les arbres dominants ayant un houppier bien développé produisent plus de graines par cône que les arbres serrés qui subissent de la concurrence de la part des arbres voisins (Nathan *et al.*, 1999).

Pris individuellement, un cône mûr a un poids moyen de $15,7 \text{ g} \pm 6,7 \text{ g}$; une longueur moyenne de $5,7 \text{ cm} \pm 1,1 \text{ cm}$ et une largeur moyenne de $2,5 \text{ cm} \pm 0,4 \text{ cm}$. Les différents paramètres mesurés sur les cônes (poids, longueur et largeur des cônes) sont corrélés significativement (r : coefficient de corrélation de Pearson compris entre 0,72 et 0,86 $p < 0,0001$). Pour la production en graines, seul un effet «provenance» au niveau du rendement a été mis en évidence par l'analyse de la variance (Khouja, 2016). Le rendement moyen en graines (rapport entre le poids des graines et le poids des cônes) s'élève à 3,13 % et varie significativement avec la provenance de 2,4 à 3,9% (Khouja, 2016). Par ailleurs, le poids des graines contenues dans un cône est de 0,48 g et fluctue selon les provenances entre 0,44 g et 0,53 g. Quant au poids moyen d'une seule graine, il est de $0,012 \text{ g} \pm 0,002 \text{ g}$. Debazac et Tomassone (1965) indiquent un poids moyen de 1000 graines très différent selon les provenances, 15,9 g pour une provenance française tandis qu'il est de 29,6 g pour une provenance tunisienne. Khouja et Sghaier (2000), travaillant sur 21 provenances tunisiennes, ont trouvé un poids moyen de 17 g variant fortement selon la provenance de 11 à 26 g. Une étude similaire réalisée par Ayari *et al.*, (2016) sur un échantillon de 12 provenances tunisiennes issues du dispositif expérimental de Korbous, montre que le rendement moyen en graines est de 3,13% et varie significativement avec la provenance de 2,36 à 3,86 %).

Le rendement en graines est corrélé significativement au poids des cônes ($r=0,6$; $p < 0,009$). La différence de production en cônes et en graines entre les provenances peut être attribuée à l'effet génétique de la provenance, à l'effet de l'environnement et aussi à la valeur intrinsèque de l'arbre lui-même (exprimée phénotypiquement par sa hauteur, son diamètre et le volume de son houppier) (Sghaier *et al.*, 1997 ; Khouja et Sghaier, 2000 ; Ayari *et al.*, 2011).

3.8 Variabilité chimique et biochimique des huiles essentielles et des huiles végétales

De nombreux travaux (Bernard-Dagand *et al.*, 1971 ; Baradat et Marpeau-Bezard, 1988 ; Gerber, 1989 ; Schiller et Grunwald, 1987 ; Baradat *et al.*, 1989 et 1995) montrent que les composés terpéniques permettent une bonne différenciation au niveau intraspécifique. Il a été aussi vérifié (Boisseux, 1986 ; Gerber, 1989) que les mono terpènes sont fortement héréditaires, ce qui leur confère une valeur sûre en tant que marqueurs génétiques.

La caractérisation terpénique de 11 provenances tunisiennes issues du dispositif expérimental de Korbous a permis d'identifier 5 composés terpéniques différents (sabinène, 3-carène, myrcène, cinéole et caryophyllène). Les terpènes à l'intérieur des provenances analysées se répartissent d'une manière aléatoire et le profil terpénique des provenances ne suit pas un gradient géographique bien défini.

Par rapport aux provenances étrangères, les provenances tunisiennes, à l'exception d'une seule (Oum Jedour), forment un groupe assez compact et très homogène. Oum Jedour a un profil terpénique très comparable avec ceux des provenances algériennes, ce qui laisse supposer que ces provenances sont génétiquement très proches. Aussi, de par sa proximité géographique à la frontière algérienne, Oum Jedour pourrait être le prolongement de la forêt naturelle du pin d'Alep algérienne en Tunisie (Khouja, 1997).

Une 2^{ème} étude réalisée par Khouja (2016) a porté sur la composition chimique des extraits à partir des aiguilles (huiles essentielles) et des graines (fraction lipidique) chez 4 provenances de pin d'Alep issues du site expérimental de Korbous. Le rendement moyen en huiles essentielles est de 1,09 % et varie significativement avec la provenance de 0,95% (Takrouna) à 1,67% (Selloum). Par ailleurs, l'analyse de la composition des huiles essentielles a révélé une forte variabilité en termes de présence-absence des composés et des taux des composés présents. En effet, on remarque une dominance nette de β -caryophyllène avec un taux moyen de 49,5 % (toute provenance confondue) qui

varie de 37,5 à 59,8% selon les provenances (Khouja, 2016). Sur un autre plan, la quantification des polyphénols et des flavonoïdes a mis en évidence un effet provenance très hautement significatif ($p < 0,0001$) et montre que c'est la provenance Takrouna qui se démarque par sa richesse en polyphénols (196,62 mg GAE/g MS) et en flavonoïdes (18,06 mg ER/g MS).

Quant aux acides gras, l'analyse montre une grande richesse en acides gras insaturés qui se chiffre à 26,5% d'acide oléique et 40,5% d'acide linoléique. La provenance Ousselatia s'est distinguée par le taux le plus élevé en acide linoléique (40,9%) et M'Guila par le taux le plus élevé en acide oléique (29,1%). Quant à la provenance Selloum, elle s'est plutôt distinguée par sa richesse en acide palmitique (15,2%) et en acide stéarique (22,7%).

3.9 Variabilité physiologique

3.9.1 Comportement des provenances en germination vis-à-vis d'un stress osmotique

Le stress osmotique est simulé par l'addition du polyéthylène glycol (PEG₆₀₀₀) dans la solution de germination, correspondant à cinq potentiels osmotiques croissants allant de 2 à 10MPa. Il a concerné les semences de 11 provenances dont 5 tunisiennes, les autres proviennent de 6 pays différents à savoir : la Palestine, le Maroc, l'Espagne, la France, l'Italie et la Grèce. Les résultats obtenus révèlent un effet régressif de plus en plus marqué en fonction de l'élévation des potentiels osmotiques par rapport au témoin (eau distillée) et une forte variabilité des provenances du point de vue pouvoir de germination.

Dans les conditions les plus stressantes (potentiel osmotique de 10 MPa), ce sont les deux provenances une tunisienne (Mellègue) et une palestinienne (Mont Carmel) qui se révèlent les moins affectées en maintenant une capacité germinative relativement élevée (60% de taux de germination).

3.9.2 Comportement des provenances en conditions de déficit hydrique

L'étude a concerné des plants cultivés en pépinière de 4 provenances tunisiennes de Pin d'Alep (Oum Jedour, Berino, Selloum et Takrouna)). A l'âge de 8 mois, les plants ont été soumis à deux régimes hydriques : irrigation régulière (témoins) et arrêt total d'arrosage (plants stressés). Le déficit hydrique est approchée par la technique des courbes « pression-volume » et la mesure des paramètres morphologiques. La tolérance des plants au déficit hydrique est fonction de la diminution des potentiels osmotiques en pleine turgescence et à turgescence nulle (Ψ_{π}^{100} et Ψ_{π}^0).

Après 42 jours de déficit hydrique (arrêt total d'arrosage), les valeurs des potentiels osmotiques Ψ_{π}^{100} et Ψ_{π}^0 obtenues montrent que les plants soumis à la contrainte hydrique diffèrent significativement des plants témoins pour les quatre provenances étudiées. La différence entre Ψ_{π}^{100} et Ψ_{π}^0 est la plus faible chez la provenance Takrouna (-26.66 bars). Cette provenance possède aussi l'ajustement osmotique le plus important (-2.88 bars). Les teneurs relatives en eau à la turgescence nulle sont élevées chez les quatre provenances, elles peuvent atteindre 83% chez les témoins et 76% chez les plants stressés. Les valeurs de l'eau liée sont faibles et sont de l'ordre de 50%. L'accumulation des solutés varie de 2.8% à 19.2% des produits osmotiquement actifs par rapport aux témoins. Au niveau du rapport tige - racine (T/R), la différence entre provenances s'est révélée non significative. A la fin du cycle de sécheresse (42 jours), la mortalité enregistrée est plus importante par ordre décroissant chez Selloum, Takrouna, Berino et Oum Jedour.

4. Principaux enseignements tirés des essais de provenances

Les essais de provenances les plus anciens de 1964 ont fait l'objet d'investigations plus poussées, les résultats qui en ont découlé présentent un double intérêt fondamental et pratique. Ils ont eu le mérite d'évaluer l'importance

de la variabilité observée entre les provenances afin d'en tirer profit pour la sélection et l'amélioration génétique de l'espèce. Ci après, sous forme synthétique, les résultats les plus importants.

4.1 Lois de variabilité géographique des provenances

Nombreuses sont les causes qui induisent une variabilité géographique au sein des espèces forestières mais il n'est pas toujours facile d'interpréter ces lois de variabilité en termes de causalité pour expliquer la nature de l'évolution qui s'est reproduite sous l'effet des facteurs géographiques. Néanmoins, en se plaçant à l'échelle de la Tunisie, la forte pression exercée par certains facteurs anthropiques (notamment défrichements, incendies, surexploitation) aurait marqué les provenances à des degrés plus ou moins importants dans le sens d'une évolution régressive (Khouja, 1997) et par conséquent aurait joué un rôle primordial pour donner tel ou tel modèle de variation (continue ou clinale, discontinue ou en "mosaïque au sens de Bouvarel (1959) et Baradat (1986). Les quelques îlots mentionnés par Shoenenberger (1967) et Marion et Poupon (1970) au Sud notamment à Jebel Orbata, Maknassy et Jebel Serraguia, et au Nord en Kroumirie et aux Mogods témoignent de l'existence d'une aire plus étendue, contrairement à ce que l'on observe actuellement. La faible variabilité du point de vue profil terpénique (Khouja, 1997) apporte une preuve sur l'homogénéité des forêts sur le plan génétique. En revanche, la variabilité plus ou moins accentuée sur le plan morphométrique résulterait d'une sélection naturelle très importante où les facteurs anthropiques et les techniques sylvicoles auraient joué un rôle prépondérant.

La différenciation entre provenances en fonction d'un caractère phénotypique donné peut être rattachée à un ou plusieurs paramètres propres aux stations d'origine. A ce titre, la corrélation trouvée entre la croissance en hauteur et chacun des paramètres géographiques à savoir la latitude, la longitude et l'altitude des sites d'origine indique une répartition continue selon un gradient positif pour le premier paramètre (latitude) et négatif pour les deux

autres (longitude et altitude). Ce modèle de répartition semble se réitérer pour le diamètre en fonction de la latitude, pour la forme en fonction de la longitude et pour la mesure de pilodyn en fonction de la longitude et de l'altitude.

4.2 La variabilité et ses répercussions sur la sélection des provenances et sur les gains génétiques attendus

4.2.1 Stabilité phénotypique

La réponse des provenances aux conditions du milieu peut varier selon les sites expérimentaux. Les provenances non soumises à l'interaction seraient par définition celles qui conservent pour un caractère donné un classement à peu près constant ; il s'agit de provenances plastiques (au sens forestier du terme). Parmi les provenances les plus performantes, celles qui offrent une plus grande stabilité sont celles qui présentent le plus d'intérêt pour l'amélioration forestière. Pour l'étude de la stabilité, on a souvent recours aux notions d'écovalence et de régression conjointe « Joint regression analysis » (Finlay et Wilkinson, 1963). Ces méthodes fournissent une explication supplémentaire de l'interaction génotype x milieu et offrent un outil efficace pour la sélection des provenances à la fois les plus vigoureuses et les plus stables (Khouja, 1977).

Les résultats montrent que le comportement des provenances vis-à-vis du changement du milieu est différent quel que soit le caractère considéré. Au niveau des provenances, ce sont principalement les provenances italiennes qui se sont révélées les plus instables. Au niveau des sites, c'est le site de Souiniet qui s'est montré le plus instable avec un comportement des provenances particulièrement très différent par comparaison aux autres sites. Cette instabilité est vraisemblablement expliquée par les conditions pédoclimatiques du site de Souiniet spécifiquement contraignantes pour le pin d'Alep (pluviométrie élevée, hydromorphie, froid excessif et sol acide).

4.2.2 Relation phénotypique entre caractères mesurés

La recherche des relations entre caractères phénotypiques a permis de mettre en évidence une étroite liaison entre les différents caractères mesurés. Pris deux à deux, des corrélations positives ont été trouvées entre la hauteur et la forme et entre la hauteur et la mesure du pilodyn. Si la première relation peut être mise à profit pour la sélection des provenances, la deuxième est plutôt contraignante du fait que la sélection des provenances les plus vigoureuses est associée à une perte de densité de bois et par conséquent risque d'entraîner indirectement une perte de la qualité. Devant une telle situation, seule une sélection multicaractère intégrant l'ensemble des caractères permet d'avoir un gain génétique optimum.

4.2.3 Sélection précoce

Au stade précoce, ce sont le poids de 1000 graines et la hauteur des plants en pépinière à l'âge de 6 mois qui se sont révélés corrélés significativement (coefficients de corrélation de Pearson (r) oscillent, selon les sites expérimentaux, entre 0,42 et 0,64). Ces deux caractères peuvent être considérés comme tests précoces de valeur prédictive "moyenne" à "bonne" au sens de Nanson (1968a), par conséquent, ils peuvent être retenus comme critères de sélection « fiables » des provenances à un stade précoce.

4.2.4 Gain génétique

Selon la méthode préconisée par Nanson (1968b), il est possible d'estimer le gain génétique à partir de l'héritabilité dans les essais de provenances. Les résultats obtenus soulignent la valeur élevée des héritabilités des caractères de croissance, de forme et de densité du bois estimée par pilodyn et du gain qu'on pourrait espérer en sélectionnant en faveur des meilleures provenances. Les héritabilités s'échelonnent entre 0,70 et 0,93 selon les caractères étudiés et elles

sont les plus élevées pour la hauteur et le diamètre. Quant au gain génétique, il varie entre 5 % et 36 %. C'est le diamètre qui affiche les valeurs les plus élevées (36%). Les résultats montrent aussi que l'efficacité de sélection du pin d'Alep, plus particulièrement pour la croissance et pour la forme, est plus grande en bioclimat humide qu'en bioclimats subhumide et semi-aride. Cependant, c'est dans les deux derniers types de bioclimat que le pin d'Alep est le mieux adapté et offre le plus d'intérêt sur le plan forestier. Par conséquent, si on considère la hauteur et la forme, on doit se contenter respectivement d'un gain génétique relatif de l'ordre de 8 - 9 % et de 5 - 6 % en bioclimat semi-aride et de 14 - 15 % et 5 - 6 % en bioclimat subhumide.

4.2.5 Recommandations en matière de sélection des provenances

Le choix des provenances pour une utilisation immédiate en reboisement doit s'orienter vers les provenances les mieux adaptées, les plus plastiques et les plus performantes pour les caractères de croissance et de forme. Malgré la liaison favorable entre les caractères de croissance (hauteur, diamètre) et de forme, il n'a pas été possible de trouver des provenances qui répondent aux exigences recherchées en termes de croissance, de qualité et de stabilité spatiale à cause de l'interaction génotype x milieu. Il a été vérifié (Khouja, 1997) que ce sont les provenances étrangères italiennes et palestiniennes et le site expérimental de Souiniet qui se sont révélés les plus instables. Leur écartement permet de réduire énormément l'interaction génotype milieu et offre le moyen de proposer une liste unique des provenances convenant à l'ensemble de la région potentielle d'utilisation du pin d'Alep en Tunisie. Après filtrage et écartement des provenances les plus instables, six provenances à savoir : Selloum, Bérino, Dernaïa, M'Guila, Oum Jedour et Mellègue paraissent répondre raisonnablement aux critères d'adaptation et de production recherchés à savoir : une bonne survie, une meilleure croissance en hauteur et en diamètre, une meilleure forme et aussi de stabilité. De ce fait, les provenances retenues peuvent convenir à une large gamme de conditions pédoclimatiques, bioclimat humide exclu.

4.3 Conception d'un programme d'amélioration sur le pin d'Alep

Un programme d'amélioration comprend une série d'opérations avec comme point de départ la population d'amélioration et comme aboutissement la population de production. Cette dernière est constituée par des variétés améliorées issues de nombreux cycles de sélection et de recombinaison. Le programme conçu par Khouja (1997) sur le pin d'Alep s'inspire de celui établi sur le pin maritime en France dont les grandes lignes ont été définies par Baradat (1991). La stratégie proposée est basée sur une sélection récurrente considérant au départ la population d'amélioration de base (F0) qu'on devrait choisir à partir de l'essai multiste des provenances. Le schéma général de ce programme (figure 5) implique deux processus qui seront menés conjointement:

- gestion de la population d'amélioration sur plusieurs cycles de sélection et de combinaison ;
- création à chaque génération des sorties variétales utilisant une fraction de la population d'amélioration à l'issue de chaque cycle de sélection. Les descendants ainsi obtenus seront de plus en plus améliorés.

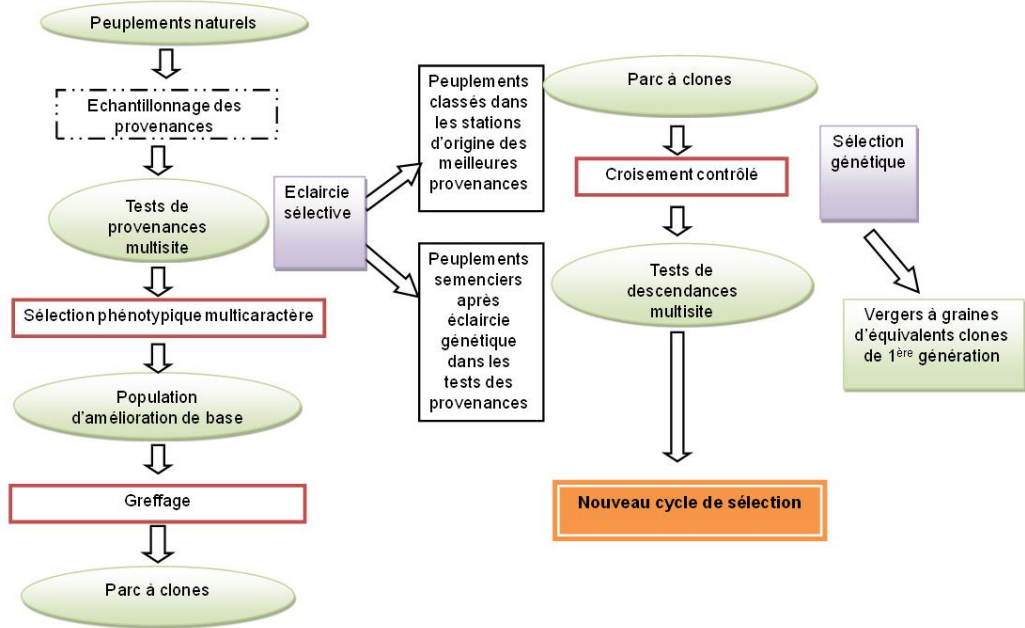


Figure 5 : Le schéma général du programme d'amélioration conçu pour le pin d'Alep en Tunisie par Khouja (1997).

La mise en œuvre optimale de ces deux processus nécessite la conciliation de deux exigences essentielles généralement antagonistes, la réalisation d'un gain génétique entretenu sur le plus grand nombre de caractères retenus d'après leur intérêt économique et adaptatif d'une part et la préservation d'une base génétique suffisamment importante d'autre part, afin d'assurer l'efficacité d'un maximum de cycles de sélection.

Pour l'identification de la population d'amélioration de départ, il a été procédé à une sélection combinée provenance-individu de 600 arbres (clones) (Khouja, 1997). Le nombre de 600 arbres a été jugé suffisant pour conserver une variabilité génétique suffisante et éviter l'altération génétique par l'effet de la consanguinité. Comme critères de sélection, ce sont la croissance en hauteur, la croissance en diamètre et la forme des arbres qui ont été retenues en priorité. La mobilisation des arbres sélectionnés devrait être assurée végétativement par greffage. Cette voie constitue un passage obligatoire pour reproduire d'une manière fidèle la qualité génétique intrinsèque des arbres sélectionnés. La

réussite d'une telle intervention est primordiale pour la constitution de la première population d'amélioration de base et conditionne toutes les opérations subséquentes dans le programme d'amélioration.

Références bibliographiques

- Elaieb M.T, Khouja M.L, Aloui F., 2009- Influence du traitement hygrothermique sur le comportement du bois de pin d'Alep de six provenances Tunisiennes. XIX^{èmes} Journées Nationales de Biologie de la SSNT «Biologie et changement climatiques» Hammamet 05 - 08 Novembre 2009.
- Aloui F, M. T. Elaieb, Khouja M. L., 2010 - Etude des propriétés physico-mécaniques du bois de pin d'Alep en fonction de la provenance et de la densité du peuplement. 1^{er} colloque International, Ressources Sylvo-Pastorales et Développement Durable en Méditerranée, Tabarka les 19 – 20 – et 21 octobre 2010.
- Ayari, A., Meftahi, M., Zammeli, F., Khouja, M.L., 2016 - Seed Production variability of Aleppo Pine (*Pinus halepensis* Mill.) within Korbous Arboretum (North East of Tunisia). Global Journal of Botanical Science, 4, 20-23.
- Ayari, A., Moya, D., Rejeb, M.N., Ben Mansoura, A., Albouchi, A., De Las Heras, J., 2011 - Geographical variation on cone and seed production of natural *Pinus halepensis* Mill., forests in Tunisia. Journal of Arid Environments, 75(5), 403-410.
- Baradat Ph., 1986 - Le pin maritime (programme d'amélioration). Rev. Forest. Franç. T.XXXVIII, Numéro spécial "L'amélioration génétique des arbres forestiers" : 121-124.
- Baradat Ph. et Marpeau-Bezard A., 1988 - Le pin maritime *Pinus pinaster* Ait. Biologie et génétique des terpènes pour la connaissance et l'amélioration de l'espèce. Thèse de doctorat d'état. Univ. de Bordeaux 1 : 551 p.
- Baradat Ph., Lambardi M. et Michelozzi M., 1989 - Terpene composition in four Italian provenances of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.). Journ. Genet. & Breed., 43 : 195-200.
- Baradat Ph., Michelozzi M., Tognetti R., Khouja M.L. et Khaldi A., 1995 - Geographical variation in the terpene composition of *Pinus halepensis* Mill. Population genetics and genetic conservation of forest trees. Academic Publishing, Amsterdam, The Netherlands : 141-158.
- Bariteau M., 1992 - Variabilité géographique et adaptation aux contraintes du milieu méditerranéen des pins de la section *Halepensis* : résultats (provisoire) d'un essai en plantations comparatives en France. Ann. Sci. Forest., 49 : 261-276.
- Bernard-Dagan C., Fillon C., Pauly G., Baradat Ph. et Illy G., 1971 - Les terpènes du pin maritime : aspects biologiques et génétiques. I. Variabilité de la composition monoterpénique dans un individu et entre provenances. Ann. Sci. Forest., 28 (3) : 223-258.
- Bouroulet F., 1994 - Contribution à l'étude de la forme du cyprès méditerranéen (*Cupressus sempervirens* L.) : Variabilité génétique, architecture et modélisation de la croissance et de la ramification. Thèse de doctorat de l'INA de Paris - Grignon : 262 p.
- Bouvarel P., 1959 - Race ou variation clinale. Rev. Forest. Franç., 6 : 463-464.

- Bouvarel P., 1974 - L'adaptation écologique des arbres forestiers. Applications à la sélection, in : La forêt : son climat, son sol, ses arbres, sa faune. Ed. Gautier Villars-Paris : 382 p.
- Daskalidou, EN., Thanos, CA., 1996 - Post-fire establishment and survival of Aleppo pine seedlings. In : Balabanis P., Eftichidis G. & Fantechi R. (eds). Forest Fire Risk and Management, Proceedings of the European School of Climatology and Natural Hazards Course. Porto Carras (Chalkidiki) Greece, May 27- June 6, 1992, European Commission, Directorate General XII, Luxembourg, pp. 357-368.
- Debazac E.F. et Tomassone R., 1965 - Contributions à l'étude comparée des pins méditerranéens de la section *Halepensis*. Ann. Sci. Forest., 22 (2) : 213-256.
- Demolin G., 1968 - Comportement des adultes de *Thaumetopaea pityocampa* Schiff. Dispersion spatiale, importance écologique. Ann. Sci. Forest., 26 (1) : 81-102 .
- Demolin G. et Rive J.L., 1968 - La processionnaire du Pin en Tunisie. Annales de l'Institut National de Recherches Forestières de Tunisie, 1 (1) : 19 p.
- Eberhart S.A. et Russell W.A., 1966 - Stability parameters for comparing varieties. Crop Sci., 6 : 36-40.
- Eccher A., Fusaro H. et Pelleri F., 1987 - Résultats de l'expérimentation italienne sur les principales provenances de pins de la section *Halepensis* : Dix ans après. Forêt méditerranéenne, T.IX (1) : 5-14.
- Euverte M., 1982 - La chenille processionnaire des pins. Forêt méditerranéenne, T.IV (2):
- Finlay R. W. et Wilkinson G.N., 1963 - The analysis of adaptation in a plant breeding program. Aust. Journ. Agric. Res., 14 : 792-754.
- Gerber S., 1989 - Chimiotaxonomie et hybridation inter- raciale chez les pins noirs (*Pinus nigra* Arn.). Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome de l'INA. Paris-Grignon.
- Harfouche A., 1995 - Variabilité géographique et hybridation interraciale chez le pin maritime. Thèse de doctorat en Biologie forestière. Univ. Henri Poincaré, Nancy I : 153 p.
- Khouja M.L., 1985 - Contribution à l'amélioration du pin d'Alep (*Pinus halepensis* MILL.) en Tunisie - Analyse d'un essai multistationnel de provenances. Mémoire de D.E.A. présenté à la Faculté des Sciences de Tunis : 105 p.
- Khouja M.L., 1993 - Influence de l'enlèvement des cônes sur la croissance en hauteur du pin d'Alep. Note de recherches de l'Institut National de Recherches Forestières de Tunisie : 15 p.
- Khouja, ML., 1997 - Variabilité géographique du pin d'Alep en Tunisie perspectives d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois. Thèse en vue d'obtention du diplôme de doctorat en sciences agronomique et Ingénierie biologique. Université Catholique de Louvain, 181p.
- Khouja M. L., Sghaïer T., 2000 – Variabilité intraspécifique du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et possibilités de sélection à un stade précoce. Annales de l'INRGREF, 4, p183-198.
- Khouja M. L., Sghaïer T., Nouri M. et André P., 2000 – Variabilité morphométrique du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et perspectives d'amélioration génétique. Annales de l'INRGREF,

- Khouja M. L., 2001a - Variabilité de la densité du bois estimée par pénétrométrie (pilodyn) chez le pin d'Alep. *Annales de la recherche forestière au Maroc*. T. **34**, pp. 48-64
- Khouja M. L., 2001b - Amélioration génétique : inventaire et bilan des recherches entreprises en Tunisie. *Annales de l'INRGREF n°5 (numéro spécial)*. pp. 1 – 44.
- Khouja M.L., Boughecha Belkhouja K. et Zid E., 2006 - Germination de provenances de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en condition de stress osmotique, 2006. *Annales de l'INRGREF*, **9**, Numéro spécial, p1-17.
- Khouja M., 2016 - Analyse quantitative et qualitative des extraits de certaines populations de pins Tunisiens : Comparaison inter et intra-spécifique. Mémoire en vue d'obtention de Master de recherche en Gestion des écosystèmes naturels et valorisation de leurs ressources. Institut National Agronomique De Tunisie. 55p.
- Kremer A., 1986 - Méthodes et stratégies de sélection. *Rev. Forest. Franç.* T.XXXVIII, Numéro spécial "L'amélioration génétique des arbres forestiers" : 89-101.
- Laurent-Hervouet N., 1986 - Mesure des pertes de croissance radiale sur quelques espèces de pin en région méditerranéenne. *Ann. Sci. Forest.*, 43 (2) : 239-262.
- Marion J. et Poupon J., 1974 - Manuel pratique de reboisement. Rapport technique n°2 . F.A.O. SF/TUN 11 : 345 p.
- Moya, D., De las Heras, J., López-Serrano, FR., Leone, V., 2008 - Optimal intensity and age of management in young Aleppo pine stands for post-fire resilience. *For Ecol Manag* 255:3270–3280.
- Nanson A., 1968a - La valeur des tests précoces de la sélection des arbres forestiers, en particulier au point de vue de la croissance. Thèse de doctorat de Gembloux : 242 p.
- Nanson A., 1968b - Perspectives d'amélioration en première génération par sélection des provenances. *Silvae Genetica*, 17 (4) : 130-132.
- Nathan, R., Safriël, UN., Noy-Meir, I., Schiller, G., 1999 - Seed release without fire in *Pinus halepensis*, a Mediterranean serotinous wind-dispersed tress. *Journal of Ecology* 87 : 659–669.
- Panetsos K.P., 1986 - Genetics and breeding in the group *Halepensis*. *Forêt méditerranéenne*, T.VIII (1) : 5-12.
- Polge H. et Keller R., 1970 - Rapport de consultation en Tunisie. INRA - Station de Recherches sur la Qualité des Bois : 52 p.
- Poupon J., 1970 - Etude de la croissance chez quelques espèces résineuses et feuillues à Zerniza. Note technique de l'Institut National de Recherches Forestières de Tunisie : 32 p.
- Roman-Amat B., 1986 - Nécessité et pratique des choix en amélioration des arbres forestiers. *Rev. For. Franç.* T.XXXVIII, Numéro spécial "L'amélioration génétique des arbres forestiers" : 104-112.
- Schiller G. et Grunwald C., 1987 - Resin monoterpenes in range wide provenance trials of *Pinus halepensis* Mill. in Israël. *Silvae Genetica*, 36 (3-4) : 109-114.
- Schoenenberger A., 1967 - Les unités forestières, in : Notice détaillée de la carte phytogéographique de la Tunisie septentrionale. *Ann. Inst. Nat. Rech. Agr. Tunisie*, Vol. 40, Fasc 2 : 426 p.

- Sghaier, T., Khaldi, A., Khouja, ML., Nsibi, R., 1997 - Estimation du rendement en cônes et en graines du pin d'Alep dans les forêts de Ouergha (Sakiet Sidi Youssef-Tunisie). *Ann Rech For Maroc* 30:84–89.
- Sghaier T., Khouja M.L., et Ben Jamaa M.H., 1999. Effet de la hauteur des arbres sur le comportement de provenances de pin d'Alep vis-à-vis des attaques de la processionnaire. *Annales de l'INRGREF*, 3, p21-31.
- Spencer D.J., 1985 - Dry country pines : provenance evaluation of the *Pinus halepensis* - *Pinus brutia* complex in the semi arid region of South - east Australia. *Aust. For. Res.*, 15 : 264-279.
- Steinmetz G, 1986 - Le choix des provenances et le classement des peuplements porte-graines. *Rev. For. Franç.* T.XXXVIII, Numéro spécial "L'amélioration génétique des arbres forestiers" : 69-73.
- Tapias, R., Gil, L., Fuentes-Utrilla, P., Pardos, JA., 2001 - Canopy seed banks in Mediterranean pines of south-eastern Spain: a comparison between *Pinus halepensis* Mill., *P. pinaster* Ait., *P. nigra* Arn. and *P. pinea* L. *J Ecol* 89:629–638.
- Verkaik, I., Espelta, JM., 2006 - Post-fire regeneration thinning, cone production, serotiny and regeneration age in *Pinus halepensis*. *For Ecol Manag* 231:155–163.

CHAPITRE 3

Evolution de l'écosystème pin d'Alep dans un contexte de changement climatique

Ali Khorchani, Issam Touhami et Abdelmajid El Hamrouni

Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts. BP. 10. Rue Hédi Karray. Ariana 2080.

Université de Carthage, Tunisie

Résumé. L'étude de l'évolution de l'écosystème pin d'Alep dans un contexte de changement climatique permet de préciser son écologie et de prédire sa croissance et son évolution future. L'approche utilisée dans ce chapitre fait suite à des études déjà entreprises sur l'impact de changements climatiques sur l'écosystème pin d'Alep en Tunisie. L'analyse des relations entre la croissance du pin d'Alep et le climat par l'utilisation des variables climatiques simples (précipitations et températures) a donné des résultats suffisamment significatifs pour l'ensemble des peuplements étudiés. Ces résultats ont permis d'utiliser des modèles pour simuler l'impact des changements climatiques sur la croissance future des peuplements étudiés. Les résultats de simulation effectués par plusieurs études montrent une forte diminution de la croissance et des superficies des forêts de pin d'Alep en Tunisie. Les changements de la croissance en épaisseur les plus importants sont enregistrés chez les peuplements situés en limite sud de la forêt en Tunisie où la diminution de la croissance atteint 100% dans les stations les plus sèches. Les changements des paramètres climatiques simulés par les modèles climatiques traduisent une augmentation plus importante de l'évapotranspiration qui soumet les arbres à un stress hydrique supérieur à celui induit par le climat actuel. La tendance à la diminution de la croissance du pin d'Alep en Tunisie montre que les changements climatiques sont déjà perceptibles sur le 20^{ème} siècle. Ce résultat confronté avec les simulations de la croissance montre que la productivité du pin d'Alep en Tunisie est appelée à diminuer davantage dans le futur. Si les scénarios climatiques utilisés dans cette étude se confirmaient, la survie du pin d'Alep en Tunisie serait menacée notamment pour les peuplements de la Dorsale en limite méridionale de l'aire de répartition de cette espèce, qui justifierait une prise de mesures de conservation et de limitation des émissions des gaz à effet de serre.

Mots-clés: Ecosystème pin d'Alep, évolution, changements climatiques, Tunisie

Abstract. The evolution of the Aleppo pine ecosystem in the context of climate change. The study of Aleppo pine ecosystem evolution in the context of climate change allows specifying its ecology, to predict its growth and its evolution following the future climatic changes. The approach used in this chapter follows on studies already undertaken on the impact of climate change on Aleppo pine ecosystem in Tunisia. The Analysis of the relationship between Aleppo pine growth and climate through the use of

simple climate variables (precipitation and temperature) yielded sufficiently significant results for all studied stands. These results allowed the use of models to simulate the impact of climate change on the future growth of these studied stands. Simulation results from several studies show a marked decrease in the growth and area of Aleppo pine forests in Tunisia. The most significant changes in growth are recorded in stands located in the southern limit of the forest in Tunisia where the decrease in growth reaches 100% in the driest stations. Changes in climatic parameters simulated by climate models reflect a greater increase in evapotranspiration, which subjects trees to greater water stress than that induced by the current climate. The downward trend in Aleppo pine growth in Tunisia shows that climate change is already noticeable in the 20th century. This result, compared with the simulations of growth, shows that the productivity of Aleppo pine in Tunisia is likely to decrease further in the future. If the climatic scenarios used in this study were confirmed, the survival of the Aleppo pine in Tunisia would be threatened especially for the Dorsal stands at the southern limit of the range of this species and would justify some measures of conservation and limitation of greenhouse gas emissions.

Keywords: Aleppo pine Ecosystem, evolution, climate change, Tunisia

1. Introduction

Le réchauffement climatique est sans équivoque, plus particulièrement depuis les années 1950, les changements observés sont sans précédent et n'ont jamais été décelés depuis des décennies, voire des millénaires. L'atmosphère et les océans se sont réchauffés, les quantités de neige et de glace ont diminué et le niveau de la mer a augmenté (IPCC, 2014). Plusieurs études ont mis en évidence une augmentation à long terme de la productivité forestière au cours du siècle écoulé en Europe et en Amérique du Nord (INNES, 1991). En Tunisie, certaines études sur l'impact des changements climatiques sur l'écosystème pin d'Alep ont été réalisées (El Khorchani, 2006 ; Aloui, 2010 ; FAO, 2015). Pour déterminer l'impact de changements climatiques sur l'écosystème pin d'Alep, il est primordial de connaître d'abord les données sur le climat actuel et les changements futurs qui en résulteront.

2. Aspect climatique

2.1. Analyse des données climatiques actuelles

L'analyse des données climatiques, utilisées pour appréhender les changements climatiques et leur impact sur l'écosystème pin d'Alep à l'échelle de la Tunisie, est basée sur des données collectées entre 1950 et 2015 dans quatre stations météorologiques à savoir : Le Kef, Siliana, Kasserine et Zaghouan, pouvant être considérées comme points représentatifs de l'aire de répartition naturelle du pin d'Alep. En Tunisie, le pin d'Alep relève principalement des étages bioclimatiques semi-aride et aride (tableau 1), où la continentalité du climat est assez accusée. Il ne se trouve que très rarement dans les régions côtières, dans de petites stations d'origine plutôt artificielle.

Tableau 1: Caractéristiques climatiques et bioclimatiques des différentes stations météorologiques étudiées.

Station	P annuelle	T. moy	T. max Juillet	T. min Janvier	Q	Bioclimat	Variante
Zaghouan	481	18,3	35,7	5.6	55	Semi-aride sup.	Hiver doux
Le Kef	486	16	34,6	2.6	52	Semi-aride sup.	Hiver frais
Siliana	410	16.9	35,4	3.8	44	Semi-aride moy.	Hiver temp.
Kasserine	275	16,6	34,9	2.7	29	Aride sup.	Hiver frais

P : précipitation; T. moy : température moyenne; T. max : température maximale ; T. min : température minimale ; Q : Quotient Pluviothermique d'Emberger

L'aire naturelle du pin d'Alep est soumise à l'influence du climat tempéré, d'une part, et des influences sahariennes, qui avancent plus au moins profondément à l'intérieur du pays, d'autre part. La pluviométrie décroît du nord au sud et de l'ouest à l'est mais elle est également marquée par une variabilité spatiale et temporelle très forte. Au niveau altitudinal, le gradient pluviométrique est de 20 mm par 100 m d'élévation pour Jebel Châambi (Baldy, 1965). Les précipitations de l'hiver sont plus faibles par rapport à celles de la côte (30% dans la station du Kef et 20% à Kasserine). L'automne représente la deuxième saison du point de vue importance des précipitations avec 30 % de la hauteur de pluie annuelle dans la plupart des stations. Le printemps reste encore une saison

pluvieuse, avec 30 % d'apport annuel et il représente la deuxième saison du point de vue de l'importance des précipitations. Faibles, mais encore assez fréquentes à l'intérieur, les pluies de l'été représentent jusqu'à 19 % à Kasserine. Les températures suivent la même variation que les précipitations avec une influence accrue due à la continentalité. La variabilité des températures maximales est plus accentuée sur les régions continentales du centre-ouest montagneux. Les valeurs maximales sont observées pendant la saison estivale (juin, juillet, août). Le mois le plus chaud (Tmax) correspond au mois de juillet, où les températures dépassent 34° C pour toutes les stations. Il faut noter que la température maximale est proportionnelle à la continentalité et inversement proportionnelle à l'altitude. Quant aux températures minimales, elles enregistrent une diminution sensible sur les régions élevées. L'altitude contribue au refroidissement nocturne pendant l'automne et pendant l'hiver dans les régions de l'ouest tunisien (région du Tell et de la Dorsale). La période durant laquelle les températures minimales moyennes sont inférieures à 10° C s'étend depuis le mois de novembre, avec des températures plus faibles qui peuvent descendre au dessous de 5 °C pour la période décembre à mars. Dans toutes les stations étudiées, le mois de janvier est le plus froid (Tmin). La moyenne des minima (m) de janvier est inversement proportionnelle à la continentalité et à l'altitude. La station de Siliana est située dans une variante bioclimatique tempérée. Le Kef et Kasserine, deux stations continentales d'altitude, se trouvent dans une variante fraîche ($m < 3^{\circ} \text{C}$) alors que les stations de Zaghouan et Siliana se trouvent respectivement dans une variante douce et tempérée (tableau 1). Dans les régions continentales et sous l'effet de l'altitude, la neige est assez fréquente, mais elle est de courte durée. Quoique localisée sur la partie montagneuse, elle tombe parfois sur les régions les plus basses et les plus méridionales. La neige apparaît le plus fréquemment en janvier et en février. Quant au gel, il est très fréquent surtout dans les régions continentales. Sa fréquence est très marquée en hiver et surtout au printemps. Schönerberger (1970) signale qu'un gel tardif, pendant le printemps, provoque l'avortement des fleurs du pin d'Alep. Au nord de la Tunisie, les vents efficaces ont des directions prépondérantes ouest et nord-

ouest, sont généralement chargés de pluie et sont les plus fréquents durant la période de septembre à mai. Pendant l'été, le type le plus fréquent est le vent de direction sud, sud-est et sud-ouest. Ces types de vents, connus sous le nom de sirocco, sont très desséchants du fait qu'ils accentuent l'influence des températures sur le bilan hydrique des sols et sur la végétation. Le sirocco est fréquent d'avril à septembre, mais il peut se manifester en toute saison. On note 51 jours de sirocco au Kef et 70 jours à Kasserine (Bortoli *et al.* 1969).

La saison sèche va en augmentant du nord au sud (figure 1). La saison sèche est plus longue à l'intérieur du pays, en comparaison de ce qui se passe généralement dans les zones côtières, elle peut commencer en mai et durer jusqu'au mois d'octobre, voire tout l'automne comme c'est le cas à Kasserine.

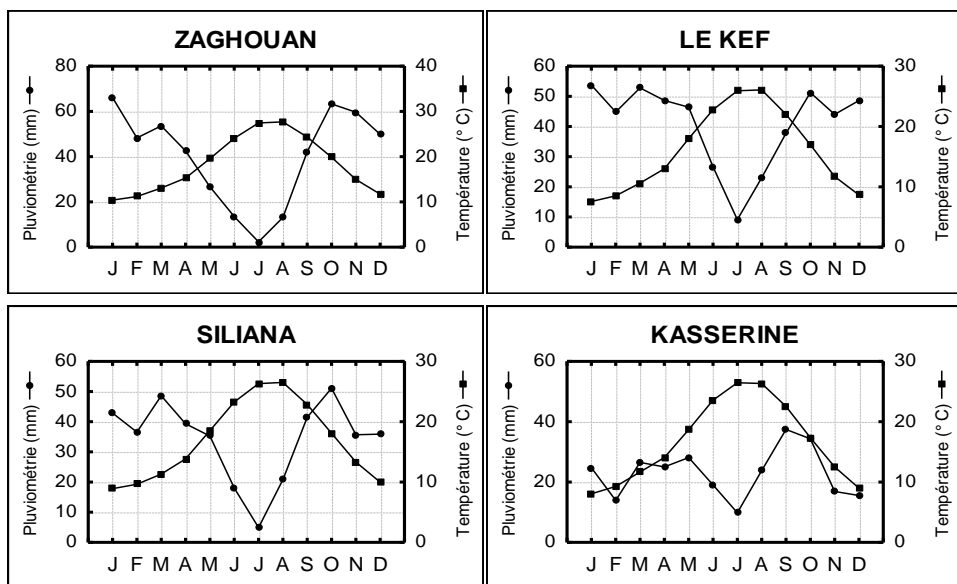


Figure 1 : Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gausson des différentes stations météorologiques situées dans l'aire naturelle du pin d'Alep en Tunisie.

2.2. Analyse des changements climatiques : Observations et simulation

➤ Les observations

Aujourd'hui, les scientifiques parlent désormais d'un réchauffement inquiétant du climat qui serait déjà amorcé et qui pourrait atteindre 2 à 4° C dans les années 2050 (IPCC. 2014). Selon une étude faite par GTZ (2007), les tendances des températures et des précipitations moyennes annuelles, à partir de la technique du maillage (grid-data), ont été étudiées pour la Tunisie. Pour la température, le point fondamental est qu'il y a une tendance significative à la hausse de + 1,2 °C au cours du siècle passé (figure 2).

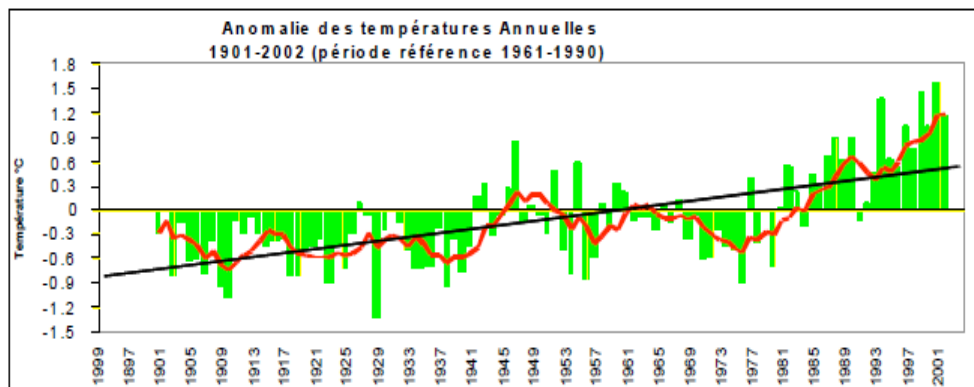


Figure 2 : Anomalies des températures moyennes au cours du siècle passé (1890 - 2001) reconstruites à partir de l'ensemble des grid-data pour la Tunisie (GTZ, 2007).

Concernant les précipitations, la période de référence 1961-1990 est caractérisée par une tendance à l'augmentation en comparaison avec les périodes précédentes 1931-1960 et 1901-1930 (figure 3).

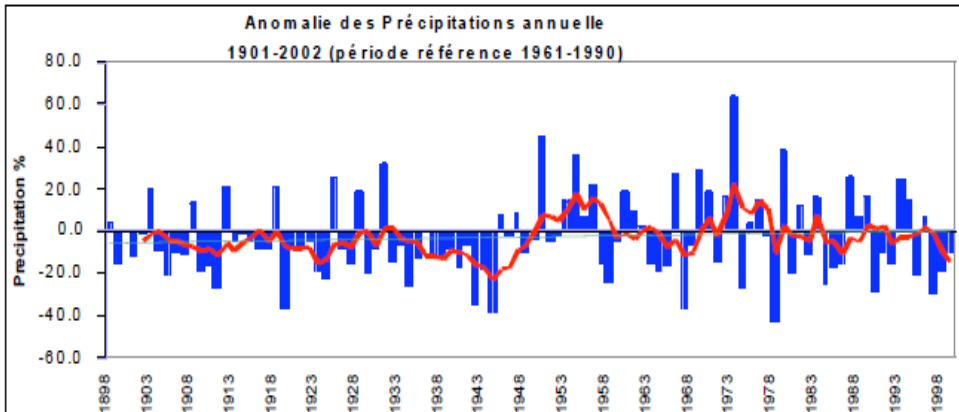


Figure 3: Anomalies des précipitations annuelles moyennes au cours du siècle passé (1898 - 1998) reconstruites à partir de l'ensemble des grid-data pour la Tunisie (GTZ, 2007).

➤ Les simulations

L'analyse se réfère à une étude récente du Tyndall Centre concernant la Tunisie dans laquelle les résultats de quatre modèles ont été projetés (GTZ, 2007) : les modèles canadien (CGCM2), australien (CSIRO mk2), américain (DOEPCM) et britannique (HadCM3). Les scénarios extrêmes A1, A1F1 ainsi que les scénarios moyens A2 et B2 du SRES ont été combinés aux modèles cités (GTZ, 2007). L'analyse de ces projections indique qu'à l'échelle annuelle, les modèles DOEPCM et CSIRO donnent des résultats extrêmes bas et hauts respectivement. Les modèles CGCM2 et HadCM3 donnent des augmentations des températures médianes de l'ordre de +3 °C à l'horizon 2080. Le modèle HadCM3, considéré comme étant le modèle le plus fiable, a été retenu pour projeter les températures et les précipitations des horizons futurs pour la Tunisie. La figure 4 indique l'évolution des températures pour la Tunisie selon quatre scénarios SRES (haut : A1F1, bas : B1, moyens : A2 et B2). En fonction des observations faites au sujet des tendances des températures, vérifiées au cours de la période 1950-2004, les scénarios A2 et B2 semblent mieux correspondre à

la projection du climat futur de la Tunisie même si, à l'horizon 2050, les résultats des quatre scénarios s'avèrent assez proches.

Projections des températures moyennes annuelles et saisonnières aux horizons 2020 et 2050

A l'horizon 2020, on obtiendrait une élévation générale des températures des horizons futurs par rapport à la période de référence. Suivant le scénario A2, trois zones d'augmentation se distinguent (Figure 4).

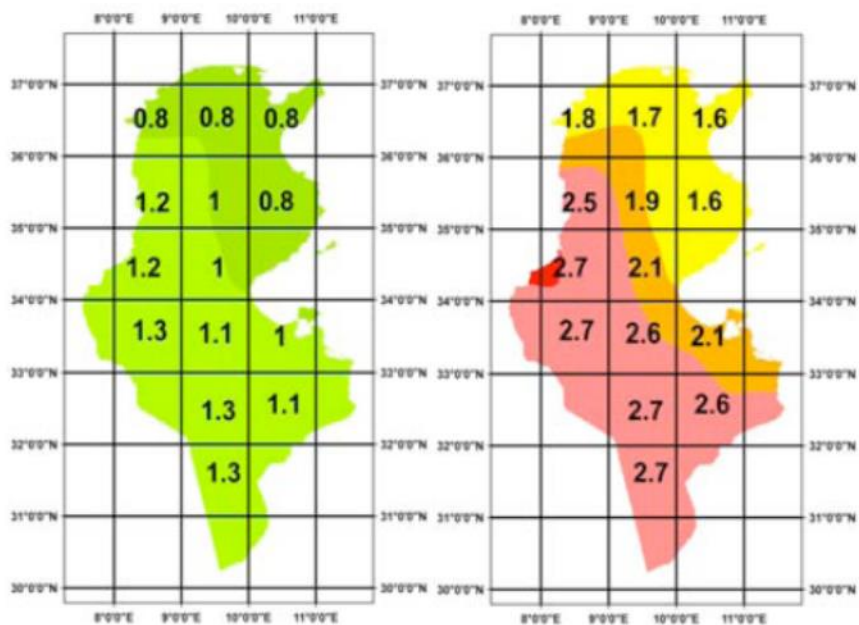


Figure 4 : Élévation des températures (°C) moyennes annuelles du modèle HadCM3 (scénario A2) par rapport à la période de référence à l'horizon 2020 (gauche) et à l'horizon 2050 (droite). (GTZ, 2007).

Les valeurs montrées dans le maillage de la figure 4 sont moyennes. Les scénarios calculés sont plus différenciés, créés à partir des données d'un maillage de 0.5° (GTZ, 2007).

Projections des précipitations moyennes annuelles et saisonnières aux horizons 2020 et 2050

La tendance générale des précipitations moyennes serait à la baisse (figure 5). Cette baisse serait faible à l'horizon 2020, mais s'accroîtrait à l'horizon 2050, suivant l'ensemble des scénarios. Sous le scénario A2, à l'horizon 2020, on noterait une baisse de 5% au Nord, 8% au Cap Bon et au Nord-Est et 10% à l'extrême Sud. Les baisses seraient faibles et on ne distingue pas de zones différenciées. A l'horizon 2050, la baisse s'accroîtrait, variant de 10% au Nord-Ouest à 30% à l'extrême Sud. On pourrait distinguer alors trois zones, une première zone de faible baisse qui se situerait à l'extrême Nord-Ouest du pays (10%), une zone Sud subissant la plus forte baisse (27%) et une zone intermédiaire correspondant au reste du pays.

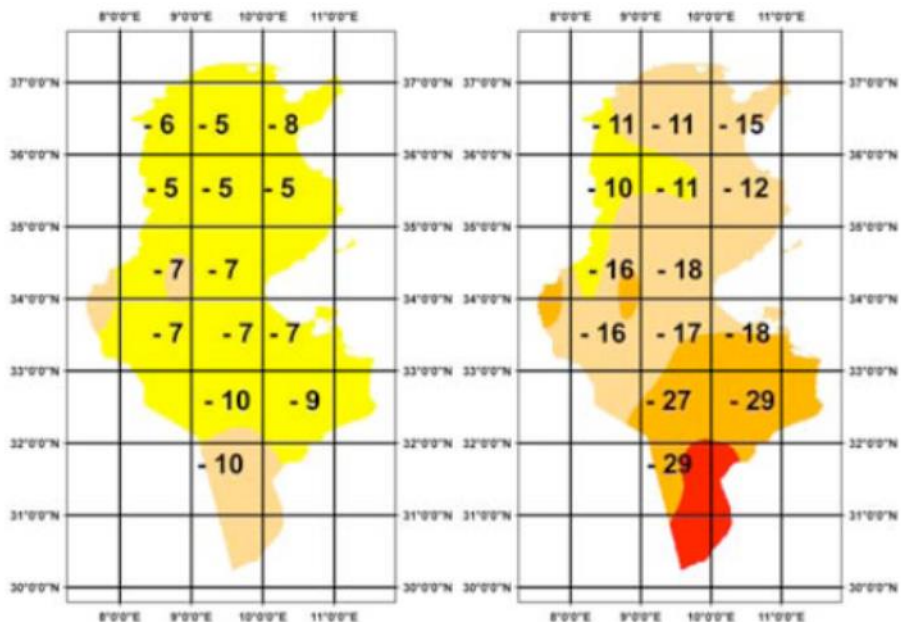


Figure 5 : Baisse (%) des précipitations moyennes annuelles du modèle HadCM3 (scénario A2) par rapport à la période de référence à l'horizon 2020 (gauche) et à l'horizon 2050 (droite) (GTZ, 2007).

3. Impact des changements climatiques sur les forêts du pin d'Alep en Tunisie

Les écosystèmes tunisiens sont particulièrement bien adaptés aux changements climatiques (NEFF, 2005). Le facteur clef de l'évolution future des écosystèmes tunisiens est la pression humaine, couplée à un impact de changement climatique (Aloui, 2010). Pour déterminer un scénario plausible pour les écosystèmes pin d'Alep, il est donc primordial d'avoir des données fiables sur l'environnement socio-économique, les pressions humaines et les changements climatiques qui en résulteront. Concernant les risques probables des changements climatiques pour les forêts du pin d'Alep on peut citer :

- Une augmentation générale des risques des feux des forêts.
- Une steppisation accrue de la pinède d'Alep sur ses frontières Sud, du semi-aride inférieur et de l'aride.
- Une apparition plus précoce des parasites et de prédateurs des pins dont les dégâts peuvent se répercuter sur leurs productivités.
- Une avancée de la pinède d'Alep dans les formations ouvertes des subéraies voisines (Gardimaou, Takrouna).

3.1. Relation entre les facteurs climatiques et la croissance des forêts du pin d'Alep en Tunisie

Pour bien étudier l'effet des changements climatiques sur la végétation naturelle dans les forêts, il faut tout d'abord connaître la relation entre les facteurs climatiques et la croissance des arbres (tableau 2).

exprime l'influence de l'état du stress hydrique au moment de la période maximale de croissance. Ces résultats montrent qu'en bioclimats aride et semi-aride, les conditions climatiques du printemps constituent un facteur limitant ce qui réduirait davantage l'extension du pin d'Alep dans la limite inférieure de son aire de répartition.

La relation entre la croissance et le climat a aussi été étudiée en ayant recours à des variables bioclimatiques. Parmi les variables bioclimatiques calculées, l'évapotranspiration réelle (AET) s'est révélé la variable la plus pertinente pour expliquer la variation de croissance du pin d'Alep, en relation avec le bilan hydrique. Ces résultats montrent que pour le pin d'Alep en Tunisie, le seuil d'humidité dans le sol, sous lequel les racines ne peuvent plus extraire de l'eau, est égal à 7 %. La détermination de ce seuil a permis de calculer la durée de la période pendant laquelle la croissance est interrompue, c'est-à-dire la durée de la période sèche. Les résultats obtenus pour le pin d'Alep montrent une période moyenne de sécheresse de 107 jours. Cette période varie en moyenne de 151 jours en bioclimat aride à 34 jours en bioclimats humide et subhumide. L'ajustement du seuil de température basse montre que pour le pin d'Alep en Tunisie, l'assimilation du carbone en hiver est bloquée sous des températures moyennes de 7,4 °C (températures comprises entre 4,2 et 11,8 °C). L'application de ce seuil a permis d'évaluer la durée de la période froide pendant laquelle la photosynthèse est bloquée. Cette période est en moyenne de 14 jours. L'ajustement de l'arrêt de la croissance en automne a permis de situer l'arrêt de la croissance en moyenne vers le 229^{ème} jour. Cependant, cet arrêt de croissance est plus précoce en bioclimat aride (181^{ème} jour) qu'en bioclimat humide, où la croissance du pin d'Alep se poursuit jusqu'au 282^{ème} jour sur les dunes littorales de Tabarka, ou encore jusqu'au 335^{ème} jour dans la région de Ain Draham.

L'impact de la sécheresse sur la croissance et sur la survie de pin d'Alep en Tunisie est examiné à travers un modèle de bilan hydrique (El Khorchani *et al.*, 2007). Ce modèle, testé sur le pin d'Alep, indique une nette augmentation de la sécheresse et l'apparition des cernes minces dans tous les bioclimats pendant

la période 1978-2001, par rapport à la période 1954 – 1977. La période 1978 – 2001 apparaît comme la plus sèche dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Quant à l'augmentation de la sécheresse et l'apparition des cernes minces concernent toutes les régions étudiées, elle atteint 8 années sèches et 8 cernes minces dans le bioclimat aride (tableau 3).

La sensibilité du pin d'Alep suite à l'augmentation de la sécheresse a été étudiée et comparée avec le pin pignon et le pin maritime (El Khorchani et al., 2007). Les résultats de l'application de huit scénarios de stress montrent une sensibilité différente à l'augmentation de la sécheresse selon l'étage bioclimatique. Sur les dunes littorales en bioclimats humide (Tabarka) et sub humide (Bizerte), le pin d'Alep se manifeste comme plus résistant à la sécheresse que le pin pignon et le pin maritime, puisqu'il est capable de résister à des fortes situations de stress hydrique. En bioclimats aride et semi-aride, la résistance à la sécheresse augmente du nord vers le sud. Dans les régions de Zaghouan et Sakiet Sidi Youssef (semi-aride), le pin d'Alep est plus sensible à la sécheresse par comparaison aux régions de Siliana (semi-aride) et de Kasserine (aride), où il manifeste la plus forte résistance. La comparaison de la sensibilité à la sécheresse entre les différents peuplements dans la région de Zaghouan et de Sakiet Sidi Youssef montre une résistance plus forte chez les arbres qui poussent sur les sols à faible capacité hydrique que sur des sols à bonne capacité hydrique.

Selon une étude de la FAO (2015), une détermination des niveaux de vulnérabilité, actuelle et future, aux changements globaux et climatiques des forêts des secteurs administratifs du site pilote de Siliana a été réalisée selon les principes de l'approche spatiale multifactorielle, développée par la GIZ. La vulnérabilité actuelle a pris pour situation de référence la période 1985-2005. La vulnérabilité future a été estimée avec deux scénarios : un optimiste avec le modèle RCP 4.5 et l'autre pessimiste avec le modèle RCP 8.5. La même situation de référence (1985-2005) a été projetée sur la période 2016-2035 et sur la période 2046-2065.

Tableau 3 : Répartition des années sèches (☀) et humides (☔), des cernes minces (M) et larges (L) pour les chronologies du pin d'Alep, du pin pignon et du pin maritime pour la période 1954 – 2001.

Année	H (dunes de Tabarka)			SH (dunes de Bizerte)			SA sup. (Zaghouan)	SA sup. (Sakiet)	SA moy. (Siliana)	A sup. (Kasserine)
	PA	PP	PM	PA	PP	PM	PA régional	PA régional	PA régional	PA régional
1954	M		M	L	L	L	L	L		
1955							M			
1956	L		L						M	M
1957						M	M			
1958	M	M	M		M			M	L	L
1959	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
1960	L	L		M					L	L
1961	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
1962	M		M			L		M	M	M
1963	L	L	L	L	L	L	L	L		
1964				L			L	L	L	L
1965	M	M	M	M						
1966	L	L			L	L	M		M	
1967				M	M	M	M	M	M	
1968	M	M		M			M	M		M
1969							M	M	M	M
1970		L						L	L	
1971				L	L					
1972	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
1973	M	M	M	L		L	L	L	L	L
1974		L	M	M			L	M		
1975			L		L		L	M		L
1976		L	L	L		M	L	L	L	L
1977		M		L			L		L	
1978	M		M	M			M	M	M	M
1979				M			M			
1980				L	L	L				
1981			M	M	M	M				M
1982	L	L		M						M
1983	M	M				M	L	M		M
1984				L		L	M		M	M
1985	M	M		L			L	L	L	
1986				M	M	M		M		M
1987		L	L		L	L	L	L		M
1988			M	M	M	M	M	M	M	M
1989	L	L		M	M	M	M	M	M	M
1990		M	M		M	M	L	M	L	L
1991	M	M		L	L	M		L	L	L
1992	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
1993	M	M	M		M	M			L	L
1994	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
1995		M		M	M	M	M	M	M	M
1996		L	L	L	L	L	L			L
1997	M	M	M	M		M	M	M	M	
1998	L	L	L	M			M		M	M
1999	M		M					L		
2000	M	M	M	M	L		M		M	L
2001	L			M		M	M		M	M

H : humide ; SH : Sub Humide ; SA : Semi Aride ; A : Aride

Les variables spécifiques employées pour l'analyse de la vulnérabilité de la forêt dans la zone d'étude (quatorze variables) sont regroupées en trois grandes classes : des variables biophysiques, climatiques et humaines ou anthropiques. Le groupe des variables biophysiques est composé des variables la pente, l'exposition, la profondeur des sols et la nature des sols. Les variables climatiques regroupent la profondeur des sols, la texture des sols et des représentations spatialisées des températures (maximales et minimales) et de la pluviométrie annuelle. Les variables anthropiques regroupent les dynamiques forestières (qui expriment en grande partie les délits de coupe et de défrichement), la pression pastorale, la pression sur le bois d'énergie, les incendies et la situation foncière des surfaces occupées par la forêt. Les résultats obtenus suite à l'application de cette analyse ont permis de savoir que sept secteurs sur les 41 de la zone d'étude, regroupant 10 742 ha de forêts (soit 30% de la couverture forestière totale) et 7 542 ha de garrigue (soit 25% de la superficie totale de la garrigue), sont dans une situation de très forte vulnérabilité aux facteurs biophysiques.

Pour ce qui est de la vulnérabilité aux changements climatiques, qui est en réalité la résultante des vulnérabilités factorielles (climatique, biophysique et anthropique), et ce pour la période de référence (1985-2005), les résultats de cette analyse permet de considérer que les forêts de la zone d'étude ne sont pas vulnérables aux changements climatiques pour cette période. Cette vulnérabilité demeure négligeable dans le scénario optimiste pendant la période 2016-2035, puisque seulement 17 ha de garrigue paraissent être affectés par les changements globaux. Dans le même scénario et sur la période 2046-2065, les superficies de 1 346 ha de forêts et de 661 ha de garrigues seront vulnérables aux changements globaux. Dans le scénario pessimiste et sur la période 2016-2035, les superficies forestières, classées très vulnérables, ne touchent qu'un secteur administratif et 19 ha de garrigue. Sur la période 2046-2065 des superficies forestières importantes deviendront très vulnérables aux changements climatiques. L'intégration du climat, de l'action anthropique et des conditions stationnelles a permis de produire une carte de vulnérabilité

synthétique dans la forêt du pin d'Alep de Siliana, à l'horizon 2016-2035 pour le scénario pessimiste RCP 8.5 (figure 6) (FAO, 2015).

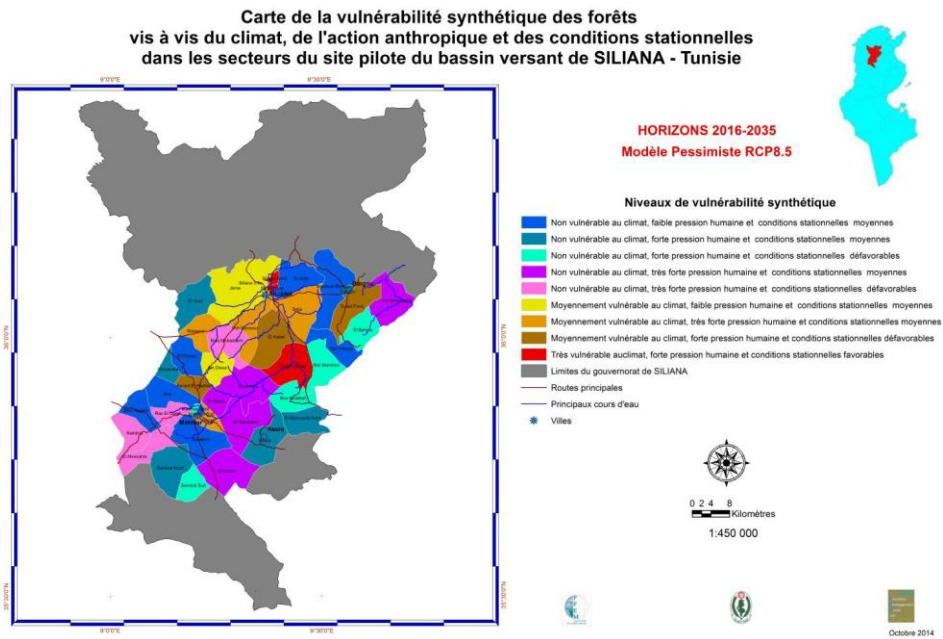


Figure 6 : Carte de vulnérabilité synthétique dans la forêt de pin d'Alep de Siliana à l'horizon 2016-2035 pour le scénario pessimiste RCP 8.5 (Source FAO, 2015)

3.2. Variation de la productivité du pin d'Alep en Tunisie pendant le 20^{ème} siècle :

L'étude menée par El Khorchani (2006) a permis de déceler les variations enregistrées sur la croissance radiale du pin d'Alep naturel en Tunisie au cours du 20^{ème} siècle. La variation de la croissance en épaisseur des cernes pour le pin d'Alep en Tunisie se manifeste par une tendance à la diminution au cours du 20^{ème} siècle. Cette tendance s'est intensifiée sur la deuxième moitié du 20^{ème} siècle et devient nettement significative (51 %) (Tableau 4, figure 7).

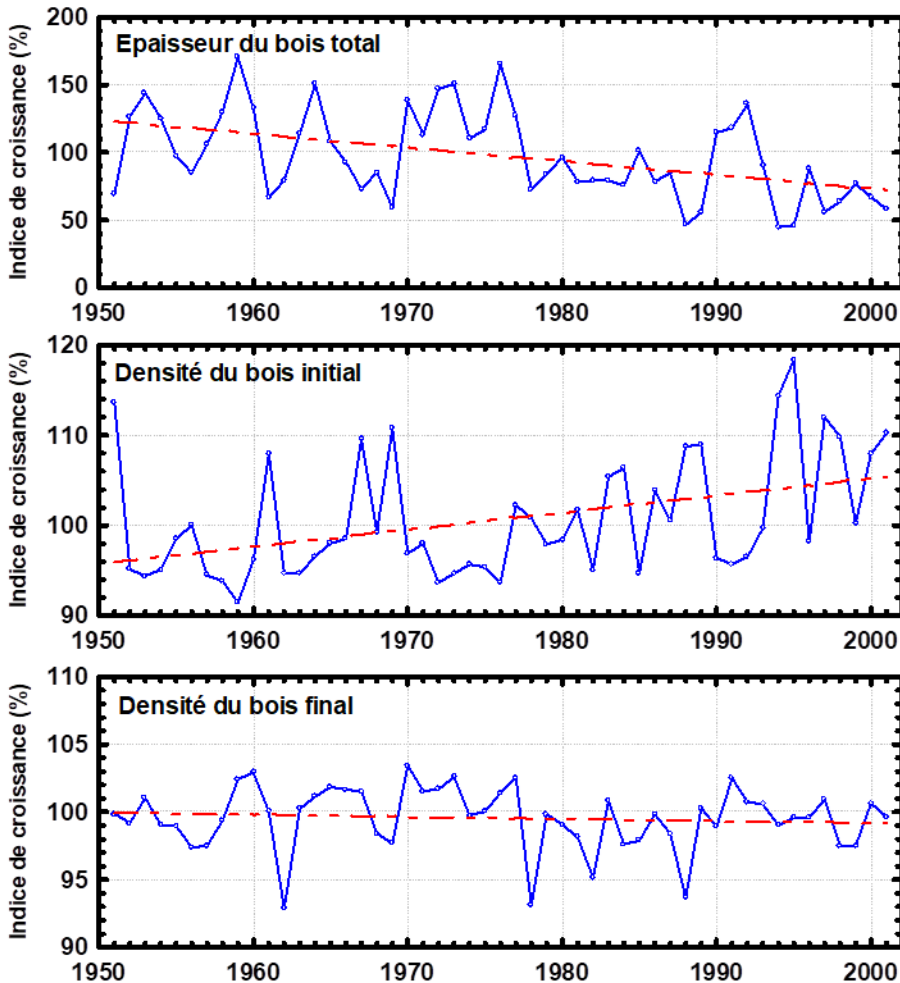


Figure 7 : Tendances détectées sur la croissance radiale du pin d'Alep naturel en Tunisie au cours de la période 1951 – 2001 (El Khorchani, 2006).

Les résultats obtenus montrent que le pin d'Alep en Tunisie pousse actuellement moins vite en diamètre, qu'il y a un demi-siècle. Une tendance à long terme apparaît aussi pour les variables densitométriques au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, mais dans le sens d'une augmentation pour la densité du bois initial (10 %) et d'une diminution pour la densité du bois final (3 %). L'augmentation du taux du CO₂ atmosphérique pourrait donc être responsable de l'augmentation de la densité du bois initial (Rathgeber, 2002). En revanche, l'augmentation des dépôts azotés pourrait être responsable de la

diminution de la densité du bois final (Briffa et al., 1998 a, b). Cependant, plusieurs phénomènes peuvent être avancés pour expliquer la tendance négative de la croissance en épaisseur des cernes telle que l'augmentation des températures et la diminution des précipitations.

Tableau 4 : Changements de croissance détectés sur les différents paramètres des cernes du pin d'Alep naturel en Tunisie au cours du 20^{ème} siècle.

	Période 1900 – 1950					Période 1951 – 2001				
	signe	Changement (%)	R	p	S	signe	Changement (%)	R	p	S
Wtot	-	9	-0.10	0.484	NS	-	51	-0.46	0.000	***
Win	-	7	-0.08	0.555	NS	-	58	-0.46	0.000	***
Wfin	-	10	-0.10	0.468	NS	-	62	-0.47	0.000	***
Din	-	3	-0.14	0.342	NS	+	10	0.43	0.002	***
Dfin	-	4	-0.45	0.001	***	-	3	-0.20	0.016	**

Wtot : largeur total du cerne, *Win* : largeur du bois du printemps, *Wfin* : largeur du bois d'automne, *Din* : densité du bois du printemps, *Dfin* : densité du bois d'automne. (Le tableau fournit le coefficient de corrélation *R* et le risque d'erreur *p* pris lorsqu'on rejette l'hypothèse d'une tendance nulle. La colonne *S* donne le niveau de signification des tendances détectées ($p \leq 0.001$: *** ; $p \leq 0.05$: ** ; $p \leq 0.10$: * ; $p > 0.10$: NS)).

La comparaison des volumes unitaires des arbres, estimés par plusieurs tarifs de cubage à des époques différentes (Soulères, 1960 et DGF, 1995) sur le pin d'Alep, a permis de constater que les arbres de même diamètre ont, en moyenne, des volumes plus élevés en 1960 qu'en 1995 (Aloui, 2010). Ces différences pourraient être liées à la diminution de la fertilité des sols de ces forêts, causée par un assèchement climatique (Aloui, 2010). Cependant, ces résultats sont critiqués par le fait que c'est difficile de concevoir des différences de volume pour un même diamètre, qu'on ne peut attribuer qu'aux modèles utilisés pour l'estimation du volume.

3.3. Les scénarios futurs

Des résultats de simulations climatiques par le modèle ARPEGE (Deque et al., 1998), appliquées sur les modèles de croissance, prévoient une diminution de la croissance pour 16 forêts de pin d'Alep échantillonnées à l'échelle de la

Tunisie, à l'échéance de 2100 (El Khorchani, 2006). Cette diminution varie de 20 % en bioclimat humide jusqu'à 100 % en bioclimat aride (figure 8).

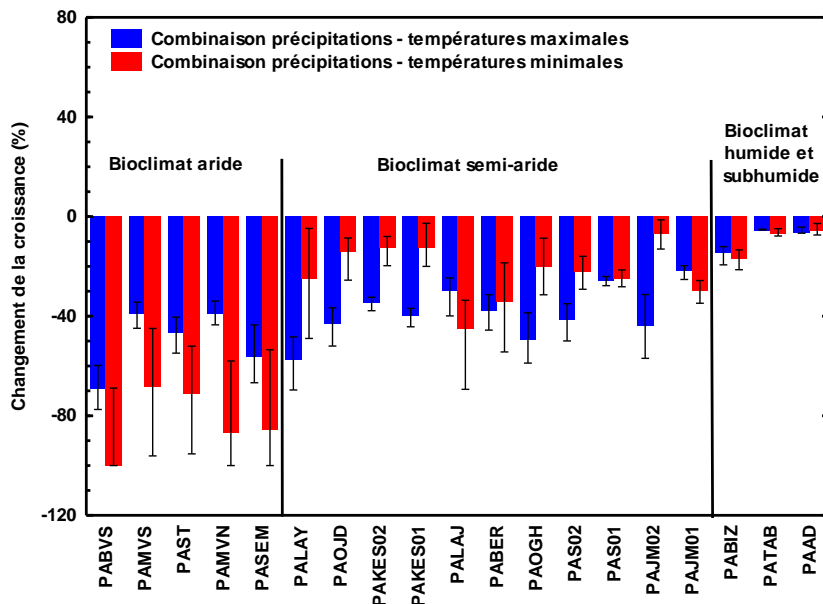


Figure 8 : Effet d'un scénario de changement climatique induit par un doublement de CO₂ atmosphérique sur la croissance radiale du pin d'Alep en Tunisie (El Khorchani, 2006).

Ces résultats semblent parfaitement plausibles puisque le climat futur en Tunisie, prédit par le modèle ARPEGE, sera plus sec et plus chaud que le climat actuel. La comparaison des changements de la croissance montre que les différences du comportement relèvent en partie des paramètres climatiques, influençant la croissance de chaque peuplement, mais aussi de la différence de réaction, des arbres vis-à-vis du climat, liée à la position géographique.

La vulnérabilité due aux changements climatiques a été aussi estimée avec deux scénarios (optimiste et pessimiste) du modèle climatique RCP 4.5 sur les forêts de pin d'Alep de Siliana (FAO, 2016). Selon cette étude, la vulnérabilité aux facteurs climatiques n'affecte pas les forêts du site pilote du bassin versant de Siliana pour le scénario optimiste, pendant la période 2016-2035 et la surface affectée ne dépasse pas 17 ha de garrigue (0,16 %) (tableau 5). Pour le même scénario et sur la période 2046-2065, la vulnérabilité climatique touche deux

secteurs, sur une superficie forestière de 1 346 ha (9,5 %) et 661 ha de garrigues (6,18 %). Pour le scénario pessimiste et sur la période 2016-2035, les superficies forestières classées très vulnérables ne touchent aussi qu'un secteur sur 19 ha de garrigue (0,17%).

Tableau 5 : Superficies (ha) des formations forestières très vulnérables aux facteurs climatiques dans les forêts du pin d'Alep de Siliana. État de référence et projections, 0 est une valeur indiquant une absence de la catégorie (source : FAO, 2015).

Délégation	Secteur	Etat de référence		Scénario optimiste (RCP 4.5)				Scénario optimiste (RCP 8.5)			
		1985-2000		2016-2035		2046-2065		2016-2035		2046-2065	
		For	Garr.	For	Garr.	For.	Garr.	For.	Garr.	For.	Garr.
Siliana nord	Siliana-Ville	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	Siliana-Nord	0	0	0	19	0	19	0	19	0	19
	Jema	0	0	0	0	0	0	0	0	852	1275
	Massouj	0	0	0	0	0	0	0	0	9	196
	Ain Ed Dissa	0	0	0	0	0	0	0	0	113	589
Siliana sud	Siliana-Sud	0	0	0	17	0	17	0	0	0	17
	Marj Mokaddem	0	0	0	0	0	0	0	0	18	1887
	Sidi Mansour	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1184
	Ouled Zenag	0	0	0	0	1346	625	0	0	1346	625
	Seja	0	0	0	0	0	0	0	0	108	900
Makhtar	Sayar	0	0	0	0	0	0	0	0	129	245
	Saddine	0	0	0	0	0	0	0	0	255	571
	Sened El Haddad	0	0	0	0	0	0	0	0	21	510
Er-Rouhia	El Messahla	0	0	0	0	0	0	0	0	14	724
Kessra	El Mansoura Nord	0	0	0	0	0	0	0	0	2498	316
	Bou Abdal-Iah	0	0	0	0	0	0	0	0	3363	165
Bargou	Ain Bousaidia	0	0	0	0	0	0	0	0	2884	1159
	Ouled Frej	0	0	0	0	0	0	0	0	2498	316
Total		0	0	0	17	1346	661	0	19	14112	10690

For. : Forêt ; Garr. : Garrigue

Sur la période 2046-2065, des superficies forestières importantes deviennent très vulnérables aux changements climatiques. Cette vulnérabilité touche 18 secteurs administratifs, sur 14 112 ha de forêts et 10 690 ha de garrigues.

3.4. Adaptation des écosystèmes pin d'Alep aux changements climatiques

La variabilité climatique et la saisonnalité prononcée des éléments climatiques (température et précipitations) caractérisent le cycle climatique naturel de la Tunisie. Dans ce contexte, les situations météorologiques extrêmes constituent autant d'aléas et de risques pour les écosystèmes pin d'Alep en Tunisie. De tels phénomènes climatiques extrêmes, avec des probabilités différentes d'apparition, peuvent provoquer des dégâts importants par des sécheresses, des inondations et, par suite, des pertes de production. Afin de maintenir la durabilité des ressources naturelles et des écosystèmes forestiers, de nombreux efforts devraient être déployés en Tunisie dans la recherche et la mise en œuvre d'options et d'alternatives intégrées et stratégiques, qui seraient en mesure de contribuer à amortir les effets des changements climatiques (Aloui, 2010 ; GTZ, 2007). Dans ce sens, il apparaît important de :

- **Appliquer les règles de bonnes pratiques sylvicoles**

Adopter des structures complexes, des rotations courtes des soins, de mélanges d'essences, de reboisement favorisant les mélanges et suivre *in situ* et *ex situ* les réactions des écosystèmes forestiers aux changements climatiques et aussi mettre en place de nouveaux *arboreta* et des essais de provenances afin de déceler des espèces/provenances plus tolérantes à la sécheresse.

- **Adapter les peuplements forestiers aux risques accrus des feux incontrôlés**
- **Lutter contre les ravageurs et les maladies**

4. Conclusion

Les résultats donnés dans ce chapitre constituent une contribution aux recherches sur l'impact des changements climatiques sur l'écosystème pin

d'Alep en Tunisie et donnent un éclairage sur l'évolution de sa croissance suite aux changements climatiques futurs. Le modèle statistique de croissance (fonctions de réponse) prévoit une diminution de la croissance qui varie de 20 % en bioclimat humide jusqu'à 100 % en bioclimat aride. Cette diminution, qui est liée à une baisse des précipitations et à une augmentation des températures, dépend des paramètres climatiques influençant la croissance de chaque peuplement et de la position géographique. Une diminution significative de la croissance en épaisseur de l'ordre de 51 % a été mise en évidence au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle pour le pin d'Alep naturel en Tunisie. En revanche, une augmentation de la densité du bois initial de 10 % accompagnée d'une diminution de la densité du bois final de 3 % ont été également détectées au cours de la même période. Pour la densité du bois, la concordance de nos résultats avec les observations à l'échelle mondiale et les études expérimentales permet d'attribuer les tendances détectées dans les paramètres densitométriques du bois à l'augmentation des taux du CO₂ atmosphérique et des dépôts azotés. La diminution de la densité du bois final pourrait être attribuée à une augmentation des dépôts azotés. Par contre, l'augmentation des taux du CO₂ atmosphérique pourrait être à l'origine de l'augmentation de la densité du bois initial pour le pin d'Alep naturel en Tunisie. La tendance à la diminution de la croissance du pin d'Alep en Tunisie montre que les changements climatiques sont déjà perceptibles sur le 20^{ème} siècle. Ce résultat confronté avec les simulations de la croissance montre que la productivité du pin d'Alep en Tunisie est appelée à diminuer davantage dans le futur. Si les scénarios climatiques utilisés dans cette étude se confirmaient, la survie du pin d'Alep en Tunisie serait menacée notamment pour les peuplements de la Dorsale en limite méridionale de l'aire de répartition de cette espèce et justifierait la prise d'un ensemble de mesures orientées principalement vers la conservation de la ressource et la limitation des émissions des gaz à effet de serre. Toutefois, le chapitre ne prétend pas présenter tout ce qui a été fait comme travaux de recherche sur ce sujet, à cause de la difficulté d'accès à l'information, ou par faute de disponibilité de publications. Néanmoins, les références et les études citées dans ce chapitre,

devraient permettre au lecteur d'avoir une meilleure idée sur certains aspects, tels que l'aspect écophysiological, sanitaire ou socioéconomique, afin de cerner plus précisément les effets des changements climatiques à court et à moyen terme.

Références bibliographiques

- Aloui A., 2010 - Changements climatiques en Tunisie et impact sur les forêts. Atelier avec les décideurs et les parties prenantes concernées, 1-2 juin 2010 Rabat Maroc.
- Baldy Ch., 1965 - *Climatologie de la Tunisie Centrale*, FAO, Tunisie : 80 p + cartes.
- Bortoli L., Gounot M., Jacquinet J.C., 1969 - *Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie septentrionale*. Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie 42 (1) : 235 p.
- Briffa K.R., Schweingruber F.H., Jones P.D., Osborn T.J., Harris I.C., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. & Grudd H. 1998 a.-Trees tell of past climates : but are they speaking less clearly today ? *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 353 : p 65-73.
- Briffa K.R., Schweingruber F.H., Jones P.D., Osborn T.J., Harris I.C., Shiyatov S.G., Vaganov E.A , 1998 b.-Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature* 391 : p 678-682.
- Deque M., Marquet P. & Jones R.G., 1998- Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Climate Dynamics* 14 : p 173-189.
- Direction Générale des Forêts DGF 1960 à 1996- Ensemble de procès verbaux d'aménagement des forêts.
- El Hamrouni A. 1994 – Végétation forestière et préforestière de la Tunisie. Typologie et éléments pour la gestion. N°spcial 6/94, Revue de Régions Arides. Edité par l'Institut des Régions Arides, Mdenine, Tunisie.
- El Khorchani A., 2006 - *Approche dendrochronologique de l'influence des changements climatiques sur la productivité des forêts de pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en Tunisie*. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille III, France, 211p.
- El Khorchani A., Gadbin-Henry C., Bouzid S., Khaldi A., 2007 - L'impact de la sécheresse sur la croissance de trois espèces forestières en Tunisie (Pinus halepensis Mill., Pinus pinea L. et Pinus pinaster Sol.). *Sécheresse* 18(2), 1-9.
- FAO 2015 - *Analyse de vulnérabilité au changement climatique du couvert forestier, La forêt de Siliana (Tunisie). Rapport technique : Optimiser la production des biens et services par les écosystèmes boisés méditerranéens dans un contexte de changements globaux*.
- GTZ 2007 - *Stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques- cahier 7 rapport des groupes d'experts*.
- Innes J.L., 1991- High-altitude and high-latitude tree growth in relation to past, present and future global climate change. *The Holocene* 1 (2) : p 168-173.

IPCC AR5 WGII, 2014- *Fifth Assessment Report - Impacts, Adaptation and Vulnerability* - <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>

Neff C., 2005- *Ecosystèmes tunisiens: une vision prospective face aux changements climatiques et globaux*. In : Pillet, G. (Eds): *Changements climatiques: Effets sur l'économie tunisienne et stratégie d'adaptation pour le secteur agricole et les ressources naturelles*, p. 136-153, Genève.

Schoenenberger A., 1970 - *Etude du couvert végétal de l'Aurès oriental*. FAO, Algérie : 15 p.

Soulères G., 1969 - *Le pin d'Alep en Tunisie*. Annales de l'Institut National de Recherches Forestières de Tunisie. Vol.2 Fasc. I. INRFT, Ariana, Tunisie.

Rathgeber C., 2002- *Impact des changements climatiques et de l'augmentation du taux de CO2 atmosphérique sur la productivité des écosystèmes forestiers : exemple du pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en Provence calcaire (France)*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III, France, 312 p + annexes

CHAPITRE 4

Les groupements végétaux du pin d'Alep et leur dynamique en Tunisie

Abdelmajid El Hamrouni, Kaouther El Hamrouni-Aschi et Ali El Khorchani

Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts. BP. 10. Rue Hédi Karray. Ariana 2080.

Université de Carthage, Tunisie

E.mail :magidhamrouni@gmail.com

Résumé. Les groupements végétaux des forêts de pin d'Alep ont été décrits à la fois par la méthode physionomiste (école de Duvignaud) et par la méthode sigmatiste (école de Braun Blanquet). Ils s'intègrent dans des séries et étages de végétation. Ces derniers correspondent aux zones bioclimatiques pour les physionomistes et aux étages méditerranéens d'Ozenda et ceux de Quezel pour les sigmatistes. L'ensemble des groupements s'inscrit dans une dynamique régressive dont les principales causes sont d'ordre anthropique. La possibilité de leur réhabilitation est suggérée.

Mots-clés: Pin d'Alep, groupements végétaux, méthode physionomiste, méthode sigmatiste.

Abstract. : **The vegetative groupings of Aleppo pine and their dynamic in Tunisia.**

The vegetative groupings of the pine forests of Aleppo were described both by the physiognomy method (Duvignaud's school) and by the sigmatist method (school of Braun Blanquet). They are integrated into series and floors of vegetation, which correspond to the bioclimatic zones for the physionomists and to the Mediterranean stages of Ozenda and those of Quezel for the sigmatists. All the groups are in a regressive dynamic mainly caused by anthropogenic pressures. Possibility of their rehabilitation is suggested.

Keywords: Aleppo pine, vegetative groupings, physiognomy method, sigmatist method.

Introduction

En dépit des gigantesques défrichements de l'époque romaine et les grandes destructions opérées par les vandales, les premiers arabes qui pénétrèrent en Tunisie l'ont qualifiée de "Tunisie la verte". Les géographes arabes du moyen-âge disaient qu'on pouvait aller à l'ombre des arbres, de Tripoli à Annaba. C'est à la suite des missions de Peyssonnel (1725-1727) et de Desfontaines (1783-1786), dans les régences de Tunis et d'Alger et jusqu'à nos

jours, que la Tunisie a bénéficié et bénéficie encore sur l'ensemble de son territoire, des travaux d'une pléiade de botanistes dont Kralik (1854), Doumet-Adanson (1874), Cosson(1884), Bonnet (1893), Cuénod *et al.* (1954), Pottier-Alapetite (1979 ; 1980), Ghrabi-Gammar (1999), Nabli (2011 ; 2013 ; 2015) et phytosociologues Braun-Blanquet (19'49;1953), Guinochet (1951 ; 1953 ; 1977 ; 1980) Debazac (1959), Debazac *et al.* (1953), Schoenenberger *et al.* (1967), Long (1954), Le Houérou (1959 ; 1969), Froment *et al.* (1966), El Hamrouni (1978 ;1992), El Hamrouni et Loisel (1979), El Afsa (1978), Boudouresque (1978), Chaabane (1984 ;1993), Garchi (1992), Gehu et Gehu Franck (1986), Vanden Berghen (1990), Ferchichi (1999), El Hamrouni-Aschi *et al.*(2016).

La mise en évidence des groupements végétaux des formations à pin d'Alep a été abordée en Tunisie par la méthode de Duvignaud et par la méthode Zuricho-montpellieraine (ou sigmatiste*) fondée par Braun Blanquet (Br Bl), largement utilisée pour l'analyse de la végétation méditerranéenne. Ces méthodes aboutissent à la notion d'association végétale avec une définition, une hiérarchisation et une nomenclature différentes.

Pour Duvignaud (1946), « l'association qui se manifeste sur le terrain par sa physionomie nous apparait comme la somme d'un certain nombre de groupes écologiques, imbriqués les uns dans les autres, le groupe le plus favorisé et qui est en général dominant, forme le noyau caractéristique de l'association». Pour cet auteur « un groupe écologique est formé d'espèces réunies par une similitude d'appétence pour certaines conditions de milieu déterminées ».

Par ailleurs, Duvignaud distingue pour la sous-association la hiérarchie suivante :

- Race géographique
- Variante liée à la nature du sol
- Forme liée à l'humidité du sol
- Stade évolutif

Le Houérou (1959) pour sa part, considère que « les variations de compositions floristiques, au sein d'une association végétale, peuvent avoir trois

origines différentes : le climat, le sol, l'action humaine et animale, facteurs agissant isolément ou simultanément ». Pour lui, l'association se subdivise en :

- Variante, induite par une modification climatique
- Sous-association résultant de conditions édaphiques
- Faciès, résultant de l'action humaine et animale
- Série, désignant des variations quantitatives
- Stade, étape dynamique.

C'est sur cette base physiologique que les cartes phytoécologiques de la Tunisie méridionale (Le Houérou, 1959) et de la Tunisie septentrionale (Gounot et Schoenenberger, 1966), ont été établies. Les feuilles IV et V de cette dernière, intéressent particulièrement les groupements végétaux des principales pinèdes à pin d'Alep de la Tunisie.

Notre propos essaiera de donner un aperçu sur l'ensemble de ces groupements tels que décrits par leurs auteurs, sur leur dynamique et les possibilités de développement et de conservation du couvert forestier.

I. Groupements végétaux de la pineraie à Pin d'Alep

Les différents groupements décrits dans la notice de la carte phytoécologique de la Tunisie septentrionale (Gounot et Schoenenberger, 1966), à l'échelle 1/200.000ème, sont classés dans différents étages et séries de végétation dont deux concernent le pin d'Alep :

Série du pin d'Alep à chêne vert

Série du pin d'Alep

Nous reviendrons plus loin sur les notions d'étage et de série de végétation.

Le tableau 1 donne l'étage, la série et les groupements du pin d'Alep mentionnés dans les feuilles IV et V de la carte phytoécologique de la Tunisie septentrionale.

Tableau 1 : Groupements végétaux de la pineraie à pin d'Alep.

Etage bioclimatique et de végétation	Série	Groupement à
SH	PA à CV	<i>Pinus halepensis</i> , <i>Catananche coerulea</i> (avec 2 faciès dont 1 de dégradation) <i>Pinus halepensis</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Colutea arborescens</i> (avec 2 faciès dont 1 de dégradation)
SAS	PA à CV	<i>Pinus halepensis</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Retama sphaerocarpa</i> (avec 2 faciès de dégradation) <i>Pinus halepensis</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Erinacea anthyllis</i> (avec 6 faciès dont 3 de dégradation) <i>Pinus halepensis</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Erica multiflora</i> (avec 5 faciès dont 2 de dégradation)
SAI	PA	<i>Pinus halepensis</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> (avec 7 faciès dont 3 de dégradation) <i>Pinus halepensis</i> , <i>Juniperus oxycedrus</i> (avec 5 faciès de dégradation)
AI	PA	<i>Pinus halepensis</i> , <i>Thymelaea tartonraira</i> (avec 2 faciès de dégradation) <i>Pinus halepensis</i> , <i>Juniperus phoenicea</i> (avec 9 faciès de dégradation) <i>Pinus halepensis</i> , <i>Juniperus phoenicea</i> , <i>Diploaxis harra</i> (avec 8 faciès dont 5 de dégradation)
AS	PA	<i>Pinus halepensis</i> , <i>Genista microcephala var. capitellata</i> (avec 9 faciès de dégradation) <i>Juniperus phoenicea</i> , <i>Pergularia tomentosa</i> , <i>Rhus tripartita</i> (avec 4 faciès de dégradation)

Source: Carte phyto-écologique de la Tunisie septentrionale au 1/200000^{ème} (feuilles IV et V)
SH= Sub humide ; SAS= Semi-aride supérieur ; SAI= Semi-aride inférieur ; AS=Aride supérieur
PA = Pin d'Alep ; CV= Chêne vert

Selon le groupement, les faciès de dégradation peuvent être parmi les suivants :

- faciès de dégradation à *Rosmarinus officinalis*.
- faciès de dégradation à *Stipa tenacissima*, *Rosmarinus officinalis*.
- faciès de dégradation à *Lygeum spartum*.
- faciès de dégradation à *Atractylis humilis* subsp *coespitosa*.
- faciès de dégradation à *Thymus algeriensis*, *Stipa parviflora*, *Stipa retorta*.
- faciès de dégradation à *Rosmarinus officinalis*, *Cistus libanotis*, *Matthiola fruticulosa*.
- faciès de dégradation à *Stipa tenacissima*, *Matthiola fruticulosa*.

- faciès de dégradation à *Stipa tenacissima*, *Helianthemum lippii* var *sessiliflorum*.
- faciès de dégradation à *Anarrhinum brevifolium*, *Echyum suffruticosum*.

Les autres faciès peuvent être selon les groupements parmi les suivants : faciès à *Quercus suber*, à *Arbutus unedo*, à *Cupressus sempervirens f. numidica*, à *Quercus ilex*, à *Juniperus phoenicea*, à *Tetraclinis articulata*, à *Ceratonia siliqua* ou à *Viburnum tinus*.

Pour Braun Blanquet (1915), l'association végétale « est un groupement végétal plus ou moins stable et en équilibre avec le milieu ambiant, caractérisé par une composition floristique déterminée dans laquelle certains éléments exclusifs ou à peu près (espèces caractéristiques) révèlent par leur présence une écologie particulière et autonome ».

Guinochet (1973) simplifie cette définition, pour lequel l'association devient « une combinaison originale d'espèces dont certaines, dites caractéristiques, lui sont particulièrement liées, les autres étant qualifiées de compagnes ».

Quelle que soit la définition qui lui a été donnée par les sigmatistes, l'association est dans la systématique phytosociologique un concept de base, ayant des unités supérieures (alliance, ordre, classe), les unes réunissant les autres, respectivement définies par des espèces caractéristiques et des unités inférieures (sous-association, variante, faciès). Les différentes associations et groupements du pin d'Alep cités ici s'intègrent dans différentes classes phytosociologiques et plus particulièrement dans celles des *Quercetea ilicis* Br.Bl.1947 et des *Ononido-Rosmarinetea* Br.Bl.1947. Remarquons que cette dernière a été scindée en *Ononidetea* et *Rosmarinetea* par Rivas Martinez *et al.* (1993).

Sans avoir abordé les unités supérieures, Long (1954) a décrit au niveau des hauts plateaux de la région de Kasserine

- l'association à *Pinus halepensis* (*Pinetum*)
 - o Sous-association à *Juniperus phoenicea*.

- l'association à *Juniperus phoenicea*, *Rosmarinus officinalis* et *Artemisia campestris* (*Junipero-Rosmarineto-Artemisetum campestris*)
 - Variante à *Stipa tenacissima* et *Cistus libanotis*
 - Variante appauvrie à *Aristida adensionis* var *coerulescens*
 - Variante à *Ziziphus lotus* et *Pistacia atlantica*
- L'association à *Rosmarinus officinalis*, *Stipa tenacissima* et *Artemisia campestris* (*Rosmarineto-stipeto-Artemisietum campestris*)
 - *Sous-association rosmarino-cistetosum libanotidis*
 - *Sous-association stipeto-plantaginetosum albicantis*
 - *Sous-association stipetosum parviflorae*

Le Houérou (1959 ; 1969) de son côté, distingue en ambiance subhumide:

- Un groupement à *Pinus halepensis* et *Pistacia terebinthus*.
- Un groupement à *Pinus halepensis* et *Stahelina dubia*.

Il propose en outre les alliances dont il définit les espèces caractéristiques

- Au sub-humide, une alliance probable du pin d'Alep.
- Au semi-aride supérieur : l'alliance à *Pinus halepensis* et *Quercus ilex*, groupant deux associations, celles à :
 - *Pinus halepensis* et *Quercus ilex*
 - *Sous-association à Erinacea anthyllis*
 - *Rosmarinus officinalis* et *Ampelodesma mauritanica*
- Au semi-Aride inférieur et aride supérieur : l'alliance *Pinus halepensis*, *Juniperus phoenicea* et *Genista microcephala*, à laquelle se rattachent les associations forestières suivantes à :
 - *Pinus halepensis* et *Teucrium compactum*.
 - *Pinus halepensis* et *Helianthemum ellepticum*.
 - *Mauricandia arvensis* subsp. *sufruticosa*, *Reseda alphonsii* et *Diplotaxis harra*, décrite sur la chaîne des chotts et la région de Gafsa, ayant une affinité avec la précédente.

Par ailleurs, Le Houérou nous donne des groupes floristico-climatiques, floristico-édaphiques et floristico-anthropiques que nous mentionnons ici avec les taxa relevant habituellement des forêts de pin d'Alep.

Groupes climatiques :

Bioclimat SH, P>600mm.

Asphodeline lutea, *Colutea arborescens*, *Pistacia terebenthus*, *Crataegus azarolus*, *Crataegus monogyna*, *Rosa canina*.

Bioclimats SAS-SH, P>400mm.

Asparagus acutifolius, *Calicotome villosa* subsp. *villosa*, *Carex halleriana*, *Quercus ilex* *Quercus coccifera*, *Cupressus sempervirens* f. *numidica*, *Juniperus oxycedrus*, *Cistus villosus*, *Cistus monspeliensis*, *Coronilla minima*, *Cynosurus elegans*.

Bioclimats SAI-SAS, P>300mm.

Ampelodesma mauritanicum, *Arisarum vulgare*, *Bupleurum balansae*, *Erica multiflora*, *Cistus salviaefolius*, *Dianthus caryophyllus* subsp. *virginicus*, *Lonicera implexa*, *Retama sphaerocarpa*, *Teucrium compactum*, *Thymilaea tartonraira*, *Helianthemum cinerium* subsp. *rubellum*, *Helianthemum croceum*, *Medicago tunetana*, *Ruta montana*.

Bioclimats AS-SAI-SAS, P>200mm.

Artemisia atlantica, *Astragalus incanus nummularioides*, *Centaurea incana* subsp. *pubescens*, *Centaurea tenuifolia* subsp. *spachii*, *Coronilla juncea*, *Dactyliis glomerata* subsp. *hispanica*, *Ephedra altissima*, *Fumana ericoides*, *Fumana thymifolia*, *Genista cinerea*, *Genista microcephala*, *Helianthemum hirtum* subsp. *Ruficomum*, *Helianthemum virgatum* subsp. *ciliatum*, *Helianthemum racemosum*, *Helianthemum pilosum*, *Olea europaea*, *Orysopsis miliacea*, *Orysopsis coerulescens*, *Periploca angustifolia*, *Pistacia atlantica*, *Pistacia lentiscus*,

Prasium majus, *Pinus halepensis*, *Rhamnus lycioides* subsp. *olioides*, *Rhamnus lycioides* subsp. *lycioides*, *Stipa tenacissima*, *Teucrium chamaepitys*, *Teucrium polium* subsp. *capitatum*, *Asperula sinanchica*, *Avena bromoides*, *Ceratonia siliqua*, *Cistus libanotis*, *Capparis spinosa*, *Ebenus pinnata*, *Galium corrudaefolium*, *Globularia alypum*, *Hippocrepis scabra*, *Jasminum fruticans*, *Juniperus phoenicea*, *Leuzea conifera*, *Lamarkia aurea*, *Hedysarum pallidum*, *Phagnalon rupestre*, *Phagnalon saxatile*, *Phillyrea latifolia*, *Rhus tripartita*, *Rosmarinus officinalis*, *Thymus capitatus*, *Thymus hirtus*, *Ruta chalepensis*, subsp. *bracteosa*.

Variantes hivernales (m°C)

5,5<m<7 : *Arisarum vulgare*, *Fumana ericoides* var. *scoparia*, *Quercus coccifera*, *Thymus capitatus*, *Saturjea nervosa*, *Sideritis romana*

3<m<7 : *Anthyllis tetraphylla*, *Ceratonia siliqua*, *Olea europaea*, *Periploca angustifolia*, *Erica multiflora*, *Prasium majus*, *Rhamnus lycioides* subsp. *lycioides*

1<m<7 : *Asparagus acutifolius*, *Pistacia lentiscus*, *Helianthemum virgatum* subsp. *ciliatum*, *Helianthemum racemosum*.

m<1 : *Erinacea anthyllis*, *Eresimum bocconeii*, *Koeleria vallesiana*, *Bupleurum spinosum*, *Carduus macrocephalus* subsp. *nutans*, *Thymelaea tartonraira*

m<3 : *Alyssum montanum*, *Artemisia atlantica*, *Avena bromoides* subsp. *australis*, *Centaurea incana* subsp. *pubescens*, *Astragalus armatus* subsp. *numidicus*, *Astragalus incanus* subsp. *nummularioides*, *Centaurea tenuifolia* subsp. *spachii*, *Helianthemum cinerium* subsp. *rubellum*, *Leuzea conifera*, *Fumana ericoides* var. *montana*, *Coronilla minima*, *Bupleurum balansae*, *Hippocrepis scabra*, *Lotophyllus argenteus*, *Ononis pusilla*, *Retama sphaerocarpa*, *Teucrium compactum*.

m<5,5 : *Bupleurum gibraltarium*, *Genista cinerea*, *Genista microcephala*, *Medicago tunetana*, *Quercus ilex*, *Thymelaea nitida*, *Cistus villosus*, *Juniperus oxycedrus*, *Lonicera implexa*, *Helianthemum hirtum* subsp. *ruficomum*, *Spartium junceum*, *Teucrium pseudo-chamaepitys*

m<7 : *Ampelodesmos mauritanicum*, *Ebenus pinnata*, *Globularia alypum*, *Juniperus phoenicea*, *Phagnalon rupestre*, *Phagnalon saxatile*, *Rosmarinus officinalis*, *Stipa tenacissima*, *Carex halleriana*, *Cistus libanotis*, *Fumana ericoides*, *Fumana laevipes*, *Phillyrea media*, *Pinus halepensis*, *Polygala rupestris*, *Ziziphus lotus*.

Groupes édaphiques

Groupe humicole (+/-) sciaphile :

Arisarum vulgare, *Bellevalia mauritanica*, *Iris planifolia*, *Jasminum fruticans*, *Pistacia lentiscus*, *Prasium majus*, *Quercus coccifera*, *Quercus ilex*, *Smilax aspera*, *Tulipa silvestris* subsp. *australis*, *Asparagus acutifolius*, *Geranium molle*, *Geranium robertianum*, *Lonicera implexa*, *Ophrys fusca*, *Ophrys speculum*, *Ophrys subfusca*, *Smyrniolum olusatrum*, *Tamus communis*.

Groupe des marnes :

Ampelodesmos mauritanicum, *Atractylis humilis* subsp. *coespitosa*, *Cynara cardunculus* var. *silvestris*, *Erinacea anthyllis*, *Medicago tunetana*, *Micropus supinus*, *Spartium junceum*, *Astragalus armatus* subsp. *numidicus*, *Astragalus armatus* subsp. *tragacanthoides*, *Astragalus incanus* subsp. *nummularioides*, *Hedysarum coronarium*, *Hedysarum pallidum*, *Phalaris truncata*, *Phalaris tuberosa*.

Groupe gypsophile :

Anabasis aphylla, *Anabasis oropediorum*, *Cleomia lusitanica*, *Echium suffruticosum*, *Launaea angustifolia*, *Launaea quercifolia*, *Lygeum spartum*, *Reseda alphonsi*, *Astragalus armatus* subsp. *numidicus*, *Astragalus armatus* subsp. *tragacanthoides*, *Broterroa amethystina*, *Limonium virgatum*, *Micropus supinus*, *Pteranthus dichotomus*, *Sisymbrium coronopifolium*.

Groupe psammophile et des grès

Alkanna tinctoria, *Crucianella angustifolia*, *Cutandia divaricata*, *Eragrostis barrelleri*, *Eragrostis pappoa*, *Eragrostis trichophora*, *Lotus citysioides*, *Lotus pusillus*, *Silene aranarioides*, *Argyrolobium uniflorum*, *Hedysarum spinosissimum*, *Hypparhenia hirta*, *Nonnea micrantha*, *Vulpiella stipoides*.

Groupe psammophile calcifuge

Cistus salviaefolius, *Linaria heterophylla*, *Filago gallica*, *Rumex buephalophorus*.

Groupe calcicole, thermophile, héliophile

Avena bromoides subsp. *australis*, *Cistus libanotis*, *Ebenus pinnata*, *Elichrysum scandens* subsp. *fontanesii*, *Globularia alypum*, *Helianthemum cinerium* subsp. *rubellum*, *Helianthemum hirtum* subsp. *ruficomum*, *Helianthemum virgatum* subsp. *ciliatum*, *Phagnalon rupestre*, *Phagnalon saxatile*, *Rhus tripartita*, *Stipa tenacissima*.

Groupe lithophile, chasmophile et des falaises

Artemisia atlantica, *Capparis spinosa* var *rupestris*, *Cheilanthes pteridioides*, *Eringium glomeratum*, *Euphoria bivonae*, *Euphorbia dendroides*, *Galium corrudaefolium*, *Galium petraeum*, *Pistacia atlantica*, *Rupicapnos numidicus*, *Scrophularia arguta*, *Scrophularia laevigata*, *Ballota hirsuta*, *Campanula atlantica*, *Erodium asplenioides*, *Erodium hymenoides*, *Ephedra altissima*, *Ephedra major*, *Launaea acanthoclada*, *Linaria organifolia*, *Parietaria mauritanica*, *Prunus prostrata*, *Scabiosa roberti*, *Silene velutinoides*, *Sedum dasyphyllum*, *Sedum sediforme*.

Nous pouvons aussi ajouter *Sedum album* et *Cotyledon umbellicus veneris* dans l'aire du pin d'Alep alors que *Scabiosa farinosa*, *Dianthus rupicola* var *hermaensis*, *Brassica cretica* subsp. *atlantica* et *Sonchus asper* subsp. *glaucescens* sont liés aux rochers maritimes.

Groupe des éboulis

Lavatera maritima, *Forskhalea tenacissima*, *Ononis natrix* subsp. *filifolia*,
Ferula tenutana.

Groupe anthropique :

Asphodellus microcarpus, *Urginea maritima*.

Garchi (1992) a décrit dans les pinèdes de Touiref (Gouvernorat du Kef), l'association et sous-associations suivantes :

- **Association** à *Pinus halepensis* et *Quercus ilex* : *Querco-Pinetum halepensis* (Long (1951), Le Houérou (1969), Schoenenberger (1967), Garchi (1992)).
 - **Sous-association** à *Quercus ilex* et *Pistacia terebinthus* : *querco-pistacietosum terebinthae* (Schoenenberger, (1967), Garchi (1992)).
 - **Sous-association** de dégradation *Pinetum halepensis-rosmarinetosum officinalis* (Garchi *et al.* 1990), se développant au semi-aride supérieur tempéré, sur sols type rendzine sur colluvions ou rendzine brunifiée sur croûte.
 - **Sous-association** *pinetum halepensis-juniperetum phoeniceae* (Long (1954), Garchi (1990)) du semi-aride inférieur doux sur sol brun calcaire intergrade à peu évolué sur marne.
 - **Sous-association** *pinetum halepensis-ericetosum multiflorae* (Garchi *et al.*, 1990), évoluant dans le semi-aride supérieur, variante hivernale douce à tempérée.

L'auteur rattache ces syntaxons à l'alliance *Pinus halepensis* et *Quercus ilex* (Le Houérou, 1959), ordre des *Rosmarinetalea* Br.Bl.1952, Classe des *Ononido-Rosmarinetea* (Br.Bl. 1947), Rivas Martinez *et al.*(1967), El Hamrouni (1978)).

A la classe des *Cisto-rosmarinetea* (Rivas Goday, 1964), ordre des *Rosmarinetales* (Br.Bl. 1931), Alliance *Rosmarino-Ericion*, Guinochet (1980) rattache :

- Le *Phagnalo-Micromerietum nervosae*, reconnu du Djebel Zaghouan jusqu'à Thala.
- Le *Fumano-Bupleuretum balansae*, reconnu dans la région du Kef, de Nébeur et Touiref.

Boudouresque (1978) reconnaît dans l'ensemble orographique de Djebel Mansour :

- l'*Oleo-Lentiscetum* Br.Bl. et Maire 1925 (Alliance *Oleo-Ceratonion* Br.Bl. 1936, Ordre des *Pistacio-Rhamnetales alaterni* Riv. Marti. 1975, Classe des *Quercetea ilicis* Br.Bl. 1947 avec les Sous-associations suivantes :
 - *scillo (obtusifoliae)-urginetosum undulatae*
 - *junipero (oxycedri)-rhamnetosum lycioidis*

Il décrit en outre trois autres associations et deux groupements, rattachés à l'alliance *Rosmarino-Ericion* Br.Bl. 1931, Ordre des *Rosmarinetales* Br.Bl. (1931 ; 1952), El Hamrouni, Kadik et Loisel 1978, Classe des *Ononido-Rosmarinetea* Br.Bl. 1947 :

- *Genisto cinereae-Ericetum multiflorae* avec trois sous-associations
 - Sous-association *typicum*
 - *odontito (purpureae)-onobrychietosum palasii*
 - *oleo-micromerietosum nervosae*
- *Polygalo rupestris-Paronikyetum capitatae*
- *Fumano calycinae-Astragaletum armati*
- Groupement à *Cistus monspeliensis*

A la classe des *Thero-Brachypodielea* (Br.Bl. 1947) Barbero et Loisel 1971, ordre des *Thero-Brachypodietales* (Br.Bl. 1931) Molinier 1934, alliance *Atractylo-Stipion capensis* Guinochet 1970, il rattache les unités de pelouses suivantes :

- *Stipo (capensis)-Plantaginetum lagopi*

- Sous-association *typicum*
- *Convolvuleto(lineati)-plantaginetosum albicantis*
- *Conolvuleto-Ononidetum pubescentis* Br.Bl. 1931
- *Gastridio (ventricosi)-Pholiuretum incurvati*

Enfin, au *Nerio-Tamaricetea* Br.Bl. et O. de Bolos (1956)1957, *Tamaricetalia* Br.Bl. 1957, il rattache pour la ripisylve le *Rubo-Nerietum oleandri* O. de Bolos 1956.

El Hamrouni (1978), dans un premier travail, étudiant les communautés végétales de la pinède de Kasserine, distingue les unités suivantes :

- Le *Cisto- Ionicereturum implexae*, au sub-humide inférieur/semi-aride supérieur.
- L'*Astragalo-Genistetum cinereae*, se développant en ambiance semi-aride supérieur et inférieur.
- Le *Genisto-Plantaginetum albicantis* dont lui sont rattachées les deux sous-associations :
 - . *Genistetosum capitellatae*
 - . *Stipetosum parvilforae*

Elles sont rangées dans la classe des *Ononido-Rosmrinetea* Br.Bl.1947, ordre *Thymo hirti-Juniperetalia phoeniceae* (El Hamrouni, Kadik et Loisel, inédit), alliance *Ononido pusillae-Juniperion rufescentis*, sous-alliance *Erinaceo Scnoenenbergeri-Genistenion cinereae*.

Généralisant ses investigations dans l'ensemble de la végétation forestière tunisienne et à la lumière de l'avancement des travaux phytosociologiques dans les pays du Maghreb, El Hamrouni (1978) remet d'abord *Juniperus phoenicea* à sa place, comme caractéristique de la classe des *Quercetea ilicis* et abandonne en Tunisie le *Thymo hirti-Juniperetalea phoeniceae* et l'*Ononido pussillae-Juniperion rufescentis*. Après avoir élevé au rang d'alliance, la sous-alliance citée plus haut, il adopte les ordres suivants définis en Afrique du Nord par Quezel *et al.* (1992).

- *Cisto mauritanici-Thymetalea munbyani* Quezel, Barbero, Benabid, Loisel, Rivas Martinez (1992).
- *Anarrhino fruticosi-Astragaletalia armati* Quezel, Barbero, Benabid, Loisel, Rivas Martinez (1992).

En indiquant les espèces caractéristiques des unités supérieures présentes en Tunisie, il range les groupements du pin d'Alep, dans les schémas syntaxonomiques suivants :

Classe : *Quercetea ilicis* Br.Bl.1947

Ordre : *Quercetalea ilicis* Br.Bl.1936

Alliance : *Quercion suberis* Loisel (1976)

Association :

Cytiso triflori-Quercetum suberis [(Br.Bl.1953) Debazac 1959], El Afsa 1978

Sous-association :

juniperetosum oxycedri El Hamrouni (1992)

Alliance : *Medicagino tuntanae-Crataegion azaroli* El Hamrouni (1992)

Associations El Hamrouni (1992):

Coluteo atlanticae -Quercetum rotundifoliae nova associ.

Sous-association : *viburnetosum tinus nova S/associ.*

Acero monspessulani-Quercetum rotundifoliae nova associ.

Roso caninae-Quercetum rotundifoliae nova associ.

Roso siculae-Quercetum rotundifoliae nova associ.

Asphodelino luteae-Quercetum rotundifoliae nova associ.

Crataego azaroli-Quercetum rotundifoliae nova associ.

Ordre : *Pistacio-Rhamnetalea alaterni* Rivas Martinez (1975)

Alliance : *Asparago-Rhamnion oleoidis* Rivas Martinez (1959)

Associations El Hamrouni (1992) :

Pistacio atlanticae- Quercetum rotundifoliae nova associ.

Sous-associations

phillyrietosum latifoliae nova S/associ.

ephedretosum altissimae nova S/associ.

Philyrio latifoliae -Quercetum rotundifoliae nova associ.

Arbuto unedi- Quercetum rotundifoliae nova associ.

Prasio majoris- Quercetum rotundifoliae nova associ.

Rho tripartitae- Periplocetum angustifoliae nova associ.

Sous-associations

prasietosum majoris nova S/associ.

rosmarinetosum officinalis nova S/associ.

Classe : Ononido-Rosmarinetea Br.Bl.1947

Ordre : Cisto mauritanici-Thymetalea munbyani Quezel, Barbero, Benabid, Loisel. Rivas Martinez 1992.

Alliance : Erinaceo Schoenenbergeri-Genistion speciosae El Hamrouni 1992

Association El Hmrouni 1992.

Rosmarino officinalis-Erinacetum schoenenbergeri nova associ.

Sous-associations

astragaletosum numidici nova associ.

loniceretosum implexae nova associ.

genistetosum speciosae nova associ.

Erico multiloraе- Globularietum alypi nova associ.

Bupleuro balansae-Rosmarinetum officinalis nova associ.

Fumano thymifoliae-Rosmarinetum officinalis nova associ.

Thymo algeriensis-Bupleuretum spinosae nova associ.

Sous-association :

cupressetosum numidici nova associ.

Genisto tunetanae_-Astragaletum numidici nova associ.

Groupement à *Anabassi aphylla-Rosmarinus officinalis nova associ.*

Ordre : Anarrhinum fruticosi-Astragaletum armati Quezel, Barbero, Benabid, Loisel, Rivas Martinez 1992

Alliance : *Helianthemum ruficomi-Genistion tunetanae* El Hamrouni
1992

Associations El Hamrouni 1992

Globulario alypi-Helianthemetum rufocumi nova associ.

Sous-associations

plantagnetosum albicaantis nova S/associ.

rosmarinetosum officinalis nova S/associ.

Limono delicatuli-Rosmarinetum officinalis nova associ.

Sous-associations

echietosum sufruticosi novaS/associ.

cistetosum clusii Snova S/associ.

Diantho caryophylli-Helianthemetum ciliatae nova associ.

Aux stations du Cyprès de Bouabdellah, Sidi Amer et Fam Elafrif, El Hamrouni-Aschi *et al.* (2016) où le pin d'Alep trouve encore sa place ont décrit les unités suivantes :

- *Cupresso numidica-Asparaguetum albi* et la sous-association *juniperetosum oxycedri*, qu'ils rattachent à l'*Asparago rhamnion oleoidis*, au *Pistacio-Rhamnetalea alaterni* et au *Quercetea ilicis*
- *Astragalo numidici- Erinacetum schoenenbergeri* et ses trois sous-associations
 - *cistetosum mauritanici*
 - *bupleuretosum spinosi*
 - *thymetosum algeriensis*

Appartenant à l'alliance *Erinaceo schoenenbergeri Genistion speciosae* et à l'ordre *Cisto mauritanici Thymetalea munbyani* de la classe des *Rosmarinetea*.

Il convient de noter que cette association et ses unités inférieures ne sont qu'un stade de dégradation très avancé de l'association *Rosmarino officinalis-Erinacetum schoenenbergeri* El Hamrouni 1992, signalée plus haut.

Par ailleurs l'indice de perturbation de Loisel et Gomila 1992), appliqué à chacune des associations ci-dessus (El Hamrouni *ibid.*), est en moyenne de **25,5 %** pour les groupements de la classe des *Quercetea ilicis* et de **69,5%** pour ceux de la classe des *Ononido-Rosmarinetea*. Rappelons que ces auteurs, considèrent que plus le nombre des Chaméphytes et Thérophytes ensemble est dominant par rapport au nombre total des espèces d'une association, plus cette dernière est perturbée.

L'indice de perturbation (IP) est déterminé par la formule suivante :

$$IP = \frac{\sum \text{Chaméphytes} + \sum \text{Thérophytes}}{\sum \text{espèces de l'association}} \times 100$$

Les unités phytosociologiques citées dans le présent travail s'insèrent selon leurs auteurs, dans les différents étages et les différentes séries de végétation qui suivent :

II. Etages et Séries de végétation des formations à pin d'Alep


Les auteurs de la notice de la carte phytocéologique de la Tunisie lient l'étage de végétation à l'étage bioclimatique (*cf. supra*). Pour éviter toute confusion, on parle maintenant de zone ou d'ambiance bioclimatique, le mot étage étant réservé à la végétation.

Pour Ozenda (1964 ; 1982), l'étage "est un ensemble de groupements végétaux réunis par une affinité écologique dans une même tranche d'altitude". Pour le même auteur, la série "est l'ensemble d'un climax des groupements qui y conduisent par évolution progressive et ceux qui en dérivent par dégradation. Le stade ultime du climax est une association forestière au sens phytosociologique du terme". Les étages de végétation proposés par Quezel (1974 ; 1979) et par

Ozenda (1975 ; 1982) pour l'ensemble de la végétation méditerranéenne, se présentent comme suit (Tableau 2).

A ces étages s'ajoutent l'Inframéditerranéen défini au Maroc par Benabid (1976) et par le Cryroméditerranéen défini en Espagne par Rivas Martinez (1980 ; 1999).

Tableau 2 : Les étages méditerranéens de végétation selon Quezel ou Ozenda.

Quezel		Ozenda
Oroméditerranéen : - Sup. non arboré - Inf.arboré		Altiméditerranéen : - Sup. - Inf.
Montagnard méditerranéen		Oroméditerranéen
Méditerranéen supérieur		Subméditerranéen (Supra-méditerranéen)
Euméditerranéen		Euméditerranéen (Méso-méditerranéen)
Thermo-méditerranéen (Méditerranéen. Inférieur)		Méditerranéen inférieur (Thermoméditerranéen)

En prenant en compte l'altitude et les facteurs thermiques, Habib Abid (Communication verbale, 2017) a procédé à la concordance en Tunisie, entre les étages et les séries de Schoenenberger *et al.* (1967) et ceux d'Ozenda et ceux de Quezel (*ibid.*).

Parmi les onze séries de végétation décrites en Tunisie par Schoenenberger *et al* (1967), deux seulement intéressent les formations à pin d'Alep. La première est celle du pin d'Alep à chêne vert évoluant en ambiance semi-aride supérieur à variante hivernale douce à chaude. La seconde est celle du pin d'Alep intéressée par les ambiances bioclimatiques semi-aride (*sensu lato*) et aride supérieur dans leurs variantes fraîches à tempérées.

Le Houérou (1969) place les groupements du pin d'Alep dans les trois séries suivantes :

- **Série du pin d'Alep à chêne vert**
- **Série du pin d'Alep à genévrier rouge**

- **Série du genévrier rouge (à pin d'Alep)**

Garchi (1992), dans la région de Touiref au N.W. du Kef, a placé ces groupements dans la série du pin d'Alep à chêne vert.

A la Kessera (Gouvernorat de Siliana), Gammare (1979) a défini à partir d'ensembles et sous-ensembles floristiques, les étages de végétation suivants :

- **Etage mésoméditerranéen** situé au-delà de 750-900 m. défini par l'ensemble du chêne vert et le sous-ensemble à *Erinacea anthyllis* de l'ensemble du pin d'Alep ; la température annuelle moyenne (T) étant supérieure à 16°C.
- **Etage thermoméditerranéen** défini par l'ensemble du lentisque et le sous-ensemble du genévrier rouge où (T) est inférieure à 15°C.
- **Etage intermédiaire** où $15 < T^{\circ}\text{C} < 16$.

Les étages individualisés dans l'aire du pin d'Alep par El Hamrouni (1992) apparaissent comme suit :

- **Etage thermoméditerranéen** caractérisé par :
 - Une tranche altitudinale de 0 à 500m.
 - Une pluviométrie moyenne allant de 150mm/an à 600mm/an
 - Une température annuelle moyenne minimale de 3°C à 10-12°C
 - Un coefficient pluviothermique Q2 de 30 à 150
 - Une ambiance bioclimatique AS, SA, SH, H dans les variantes tempérée, douce et chaude.
- **Etage mésoméditerranéen** caractérisé par :
 - Une tranche altitudinale de 500 à 1550 m
 - Une pluviométrie moyenne allant de 300mm/an à 1600mm/an
 - Une température annuelle moyenne minimale inférieure à 3°C.
 - Un quotient pluviothermique d'Emberger entre 50 et 200
 - Une variante fraîche des bioclimats H, SH, SA

Parmi les séries de végétation qui s'y encartent d'après le même auteur il y a lieu de citer les suivantes :

- **Série du pin d'Alep à chêne vert**

Outre la série du pin d'Alep, Schoenenberger *et al (ibid)*, ont défini la série du pin d'Alep et du chêne vert, évoluant au Subhumide Semi-aride supérieur dans leurs variantes hivernale tempérée à douce. Les deux associations de El Hamrouni-Aschi *et al.(ibid)* permettent de lui rattacher deux sous-séries nouvelles :

- ✓ Une sous-série mésoméditerranéenne à pin d'Alep et cyprès de Numidie.
- ✓ Une sous-série thermoméditerranéenne à oléastre et cyprès de Numidie.

- **Série mésoméditerranéenne du chêne-liège**

En dehors de la Kroumirie, le chêne-liège se retrouve sous forme de stations reliques, aux monts de Mellègue (Djebel Toula) aux Djebels Serj et Zaghouan, dans la région de Téboursouk (Djebels Cheid, Boukhobasa, Ghazouane, Guerouaou), au golfe de Tunis (Djebel Sidi Zid), au Cap Bon (Djebels Abderrahman, Hattous, Bouchoucha), en ambiance semi-aride supérieur, à variante tempérée à douce. Dans l'aire du pin d'Alep et dans la variante fraîche du semi-aride supérieur, voire du subhumide, existent aussi quelques stations où le chêne-liège est signalé par sa présence comme au Djebel Serj ou par celle de quelques espèces de son cortège (bruyère, arbousier, pulicaire) comme aux Djebels Mrhilla et Bireno. L'analyse d'ADN, des feuilles de chêne vert de la station de Mrhilla (commune aux gouvernorats de Kasserine et de Sidi Bouzid), révèle avec un taux de 12%, l'existence de chêne-liège dans cette station (Tlili, 2016). Par ailleurs, d'après une communication verbale en 2017, Ridha Mokni affirme y avoir trouvé des sujets de cette espèce. Le groupement qui correspond à cet étage est la sous-association *juniperetosum oxycedri* El Hamrouni 1992 du *Cytiso triflori-Quercetum suberis* [(Br.BI.1953) Debazac 1959 El Hafsa 1978].

- **Série mésoméditerranéenne du chêne vert**

Elle se localise sur la dorsale tunisienne, du Djebel Chambi à celui de Zaghouan, dans la tranche altitudinale au-delà de 800-900 m. Elle correspond à la série du pin d'Alep à chêne vert de la carte phyto-écologique. Outre *Quercus ilex*, les espèces qui participent à son organisation sont *Pinus halepensis*, *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*, *Crataegus azarolus*, *Rosa sicula*, *Rosa canina*, *Acer monspesulanum*, *Sorbus area*, *Chrysanthemum corymbosum*.

Le groupement qui lui correspond est l'*Acero monspessulani-Quercetum rotundifoliae*, lequel en se dégradant donne la succession suivante :

↓
Crataegio azaroli-Quercetum rotundifoliae
Roso caninae- Quercetum rotundifoliae
Asphodelino luteae- Quercetum rotundifoliae
Prasio majoris- Quercetum rotundifoliae
Roso siculae- Quercetum rotundifoliae
↓
Bupleuro balansae-Rosmarinetum officinalis

- **Série mesoméditerranéenne du genévrier rouge sur substrat gypseux**

Cette série où *Pinus halepensis* est présent, se localise de part et d'autre de Oued Mellègue sur le gypse du Trias, en ambiance semi-aride inférieure variante fraîche. Elle est représentée par le groupement *Limono delicatuli-Rosmarinetum officinalis* et celui à *Anabasis aphlla* et *Rosmarinus officinalis*.

- **Série mésoméditerranéenne du genévrier rouge sur substrat non gypseux**

Localisée entre 600 et 1000 m d'altitude, elle se développe sur marne et calcaire au semi-aride supérieur à variante fraîche.

Le groupement qui lui correspond est le *Pistacio atlanticae-Juniperetum phoeniciae* qui évolue par dégradation en :

↓
Rosmarino officinalis- Erinacetum schoenenbergeri
Thymo algeriensis-Bupleretum spionosi
Fumano thymifoliae-Rosmarinetum officinalis
↓
Genisto speciosae-Astragaletum numidici

Au niveau de cette série, l'auteur distingue deux faciès arborés, l'un à pin d'Alep, l'autre à cyprès de Numidie.

- **Série thermoméditerranéenne du chêne vert**

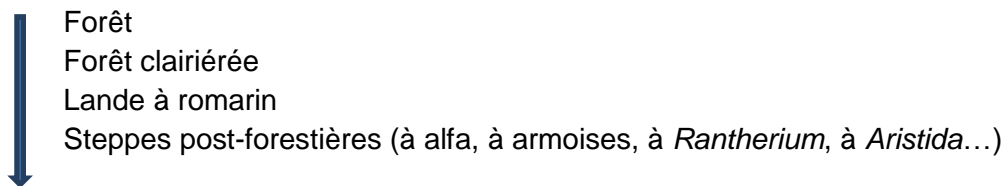
Localisée dans la région du Kef, de Teboursuk, de l'ensemble orographique de Siliana-Sud (Kessera, Serj, Bargou) et Zaghouan entre 500 et 800 m d'altitude, elle se développe en ambiance bioclimatique semi-aride supérieur tempéré sur substrat calcaire et marno-calcaire. Elle passe de la forêt à la garrigue du *Phillyreo latifoliae-Quercetum rotundifoliae* à l'*Erico multiflorae-Globularietum alypi* qui prend sa suite.

- **Série thermoméditerranéenne du *Rhus tripartita***

Elle correspond à la fois à la série du pin d'Alep de Schoenenberger *et al.*(1967) et à celle du pin d'Alep à genévrier de Phénicie de Le Houérou(1969). Elle va du Kairouanais au sud des Matmata entre 150 et 550 m d'altitude, en ambiances semi-aride inférieur et aride supérieur dans leurs variantes douces à chaude. Son évolution régressive parait comme suit :

↓
Rho tripartitae-Periplocetum angustifoliae
Dhianto caryophylli-Helianthemetum ciliatae-
Teucrio alopecuri-Rosmarinetum troglodytori
↓
Stipo tenacissimae-Hammadetum scopariae

Dans cette optique de dégradation, Froment et Van Swinderen (1966) considèrent que l'on passe de la forêt de pin d'Alep et de genévrier rouge aux steppes post-forestières par les stades suivants :



Dans le même ordre d'idée, la figure 1 en annexe (El Hamrouni, 1978), schématise l'évolution régressive et progressive de la forêt de pin d'Alep sous l'effet de facteurs écologiques favorables ou défavorables. Ces derniers sont surtout d'ordre anthropique, prenant part à coté de l'aridification du milieu, à l'infiltration de certains taxons, notamment d'heracées, du bioclimat aride dans le semi-aride. Par leur résilience, les ligneux échappent à l'influence néfaste du changement climatique. Sans l'intervention néfaste de l'homme, par leur résilience, les ligneux échappent aux mefaits du changement climatique.

III. Possibilités de remise en état des pinèdes à pin d'Alep et des autres formations forestières

De par sa connaissance du terrain, le forestier tunisien parle de forêt en bon état, forêt claire, forêt dégradée, maquis ou garrigue. Les études des groupements végétaux des forêts de pin d'Alep et également ceux des chênaies, entreprises par les phytosociologues, soulignent par la mise en évidence des faciès de dégradation et des séries régressives, d'une manière objective et scientifique, l'état de dégradation de telles forêts. Malgré les efforts de réhabilitation dont elles sont l'objet et la vigilance des responsables de leur gestion, leur dégradation semble prendre une ampleur effrayante. Elles sont au cours de ces dernières années, le théâtre d'occupations illicites, de spectaculaires coupes d'arbres, de multiples défrichements et de gigantesques incendies. Si de telles agressions persistent, nos fragiles forêts de pin d'Alep, qui ont déjà cédé la place, sur leur bordure centroméridionale, à la steppe d'alfa, qui sont aujourd'hui pour nous une source d'inquiétudes, cèderont demain leur place au désert et ne seront plus qu'une source de profonds regrets.

Sans avoir recours à des stratégies sophistiquées qui plongent la Tunisie dans une spirale d'endettement en exponentielle mais tout en faisant la politique de ses moyens, il n'est cependant pas difficile de renverser la situation en dépit des contraintes climatiques, sociologiques et économiques. Sachant bien que la Tunisie dispose d'un matériel génétique adéquat, il suffit seulement de faire preuve d'un peu de bonne volonté, d'un minimum de patience, d'un minimum d'équipement, d'une organisation et d'une discipline rigoureuses et surtout d'une grande dose de patriotisme, pour redonner au pays son manteau forestier, non seulement dans sa partie centrale domaine privilégié du pin d'Alep mais également dans sa partie nord, en Kroumirie et aux Mogods et surtout dans sa partie méridionale qui depuis longtemps a perdu son couvert végétal.

La méthodologie d'intervention s'appuiera sur les études phyto-écologiques et phytosociologiques déjà réalisées, notamment la carte phyto-écologique dans ses deux parties septentrionale au 1/200.000ème, centrale et méridionale au 1/500.000 puis en deuxième étape, une cartographie à l'échelle 1/5.000 ou au 1/10.000ème dans le cadre d'une étude de milieu du périmètre à reboiser, basée sur les groupes écologiques et les espèces indicatrices, permettant ainsi le choix des espèces autochtones ou exotiques à planter.

Bien que certaines espèces introduites aient donné leur preuve en matière d'adaptation, de rapidité de croissance et de production comme les eucalyptus ou les acacias voire les atriplex ainsi que *Parkinsonia aculeata*, certaines locales à large amplitude écologique, pouvant bien se développer, sans risque d'erreur, dans l'ensemble des zones bioclimatiques et leurs variantes, sont particulièrement recommandées pour reverdir les collines dénudées du centre et du sud, leur habitat naturel. Nous pensons spécialement au pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica*), au périploque (*Periploca angustifolia*) aux summacs (*Rhus tripartita* et *Rhus pentaphylla*) et au tamaris (*Tamarix aphylla*). Les deux premières espèces sont présentes sur l'ensemble du territoire national, du Nord au Sud et d'Ouest en Est. Elles sont le plus souvent en individus isolés mais parfois groupés en deux ou trois ou formant de petits bosquets lorsqu'ils sont sous la protection d'un marabout comme au Regueb (Gouvernorat de Sidi

Bouzid)¹. C'est au Sud de la dorsale, à partir du Kairouanais et jusqu'à la limite Est de l'Erg oriental qu'il y a du "Jdari", alors que la "Tizgha", sumac à cinq feuilles, est sur la côte orientale ou du moins le peu qui subsiste encore sur la côte orientale. Le premier de ces arbustes qui ont l'avantage de rejeter de souche, a été abusivement exploité pour son tanin durant la période entre les deux guerres mondiales, ainsi qu'après par les charbonniers, pour son fort pouvoir calorifique. Quant au tamaris, excellente espèce pour la fixation des dunes continentales, c'est dans les zones halomorphes (oueds et sebkhs) qu'il se retrouve.

Ce qui précède implique impérativement au sein de tout arrondissement forestier ou de la division à laquelle il appartient au niveau des Commissariats Régionaux au Développement Agricole, la création d'une cellule d'étude du milieu, dotée d'un phyto-écologue, d'un pédologue et d'un sociologue, pour la bonne réussite des travaux à entreprendre.

L'opération sera basée sur la mobilisation et le rassemblement des jeunes des établissements scolaires (élèves des lycées et étudiants de l'enseignement supérieur) qui, en aiguisant leur esprit patriotique et l'amour de leurs régions natales, participeront à la reconstitution du couvert forestier de la Tunisie. Les soldats, sans être oisifs, sortiront de leurs casernes pour se joindre à eux ainsi que ceux affiliés à des partis politiques et des ONG qui militent en faveur de l'amélioration et de la protection de l'environnement. Scolaires et universitaires interviendront au cours de leurs vacances, un mois durant les vacances d'été (préparation du terrain à reboiser), une semaine au cours des vacances d'hiver et une autre au cours de celles de printemps (opérations de reboisement).

Sous la tutelle des Ministères de l'Education Nationale, de la Défense, de l'Intérieur, de la Jeunesse et Sports et de l'Environnement, en étroite relation avec le Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques, ils auront l'honneur de faire partie du « Service National de Reboisement (SNR) » qui reste à créer, représenté par des commissions mixtes (techniciens, représentants des différents

¹ A la sortie de cette ville en direction de Sfax, sous un remarquable et magnifique pistachier de l'Atlas, les producteurs de pastèques de la région vendent leur marchandise, en gros et en détail.

partenaires et des différents Groupements de développement agricole), l'une régionale au niveau de chaque Gouvernorat, l'autre locale au niveau de chaque Délégation, voire sous-locale au niveau de chaque secteur, permettant ainsi aux décideurs de déterminer la nature, l'urgence et la programmation des interventions. Le rôle de la cellule d'étude des milieux, en collaboration avec tous les partenaires intéressés, est de préparer le dossier de chaque périmètre retenu. L'important rôle de l'armée n'est pas seulement de faire participer ses soldats aux travaux de terrain mais également de veiller à la sécurité, l'ordre et la discipline par ses officiers et/ou sous-officiers en étroite collaboration avec ceux du Ministère de l'intérieur. Les joueurs des clubs sportifs, chargés de plants, assureront l'approvisionnement des jeunes, reboisant les sommets dégarnis des montagnes. Le Ministère de l'Environnement de son côté, incitera les ONG environnementales à exhorter leurs adhérents pour une participation active à cette manifestation de reforestation de grande envergure.

Conclusion

Le couvert végétal tunisien a fait l'objet d'importantes analyses phytosociologiques menées par les partisans de la méthode physionomique et des groupes écologiques et par les adeptes de la synsystématique de l'école de Braun-Blanquet. De telles analyses ont mis l'accent sur l'état de dégradation des communautés végétales, notamment les forestières et plus particulièrement celles des pinèdes de la Dorsale. L'appauvrissement de la couverture forestière d'une manière générale, dû à l'action anthropozoïque, mais surtout dans sa partie méridionale, favorise insidieusement la remontée vers le Nord, d'espèces inféodées aux zones arides, contribuant ainsi à l'expansion du désert. En considérant le processus de dégradation des formations forestières comme ennemi national majeur, il est possible de le stopper en peu de temps et à peu de frais sur l'ensemble du territoire. Dans un esprit de volontariat continu, la volonté politique réunira pour un "Service National de Reboisement (SNR)" à créer, bien structuré sur le plan National, Régional et Local, réunissant toutes les forces vives

de la nation, l'armée en tête, les organisations socio-professionnelles, les jeunes surtout (élèves des lycées et étudiants de l'enseignement supérieur). Ces derniers, en remplacement du service militaire, seront organisés au niveau de chaque gouvernorat de manière qu'ils passent une partie de leurs vacances sur les chantiers de reboisement, encadrés par les autorités administrative, militaire et forestière.

Par la volonté de ses dirigeants, le patriotisme, le dynamisme et le savoir de ses enfants, par son matériel génétique originel ou par des espèces introduites à croissance rapide déjà adaptées à nos bioclimats, en même temps qu'elle retrouvera son manteau forestier bénévolement ou presque, la patrie retrouvera aussi son titre de la «Verte Tunisie ».

Références bibliographiques

- Abid H., 2017 – (Communication verbale) à propos de la correspondance entre les étages de végétation tels que définis par Emberger d'une part et ceux définis par Quezel ou par Ozenda d'autre part.
- Benabid A., 1976 - Etude écologique, phytosociologique et sylvo-pastorale de la tétraclinaie de l'Amsitène. Th. Doct. 3^{ème} cycle, Fac Sci. et Tech. St Jérôme. Univ. Aix-Marseille III.
- Braun-Blanquet, 1953 - Irradiations européennes de la végétation en Kroumirie. Vegetation, vol. IV, fasc.3. pp192-194.
- Braun-Blanquet 1949 - Premier aperçu phytosociologique du Sahara tunisien. Mémoire hors série de la Soc. d'Hist. Nat. d'Afr. du N. Alger, 2, pp39-50.
- Boudouresque E., 1978 - Etude bioclimatique et phytosociologique de l'ensemble orographique du Djebel Mansour (Tunisie). Th. Doct. 3^{ème} cycle, Fac Sci. et Tech. St Jérôme. Univ. Aix-Marseille III.
- Chaabane A., 1993 - Etude de la végétation du littoral septentrional de Tunisie : Typologie, syntaxonomie et éléments d'aménagement. Thèse Doct. ès Sci. Fac Sci. et Tech. St Jérôme. Univ. Aix-Marseille III.
- Chaabane A., 1984 - Les pelouses naturelles de Kroumirie (Tunisie) :typologie et production de biomasse. Thèse. Doct. ing. Fac Sci. et Tech. St Jérôme. Univ. Aix-Marseille III.
- Debazac E.F., 1959 - La végétation forestière de la Kroumirie. In : Ann. ENEF et Stat. Rech. et d'Expér. Tom XVI- fasc. 2. Nancy
- Debazac E.F., Guinochet M., Molinier R., 1953 - Note sur les groupements climaciques de la Kroumirie orientale. Bull. Soc.Bota.Fr.99(10) 28-32

- El Afsa M., 1978 - *Ecologie, phytosociologie, régénération et production des subéraies tunisiennes*. Th. Doct. 3^{ème} cycle, Fac Sci. et Tech. St Jérôme. Univ. Aix-Marseille III.
- El Hamrouni A., 2003 - Les groupements végétaux des massifs forestiers de Saddine, Garn Halfaya et Kalaât Sénane (Gouvernorat du Kef, Tunisie). Projet de gestion intégrée des forêts TS-P20 DGF- Groupement AEP, eXaConsult, JAFTA.
- El Hamrouni A., 2002 - La Réserve de biosphère de Chambi : rapport n°2. Ministère de l'Environnement et Aménagement du Territoire- Comité National MAB-UNESCO.
- El Hamrouni A., 1992- Végétation forestière et préforestière de la Tunisie ; typologie et modalité de gestion. Th. Doct. Es Sci. Fac. Sci. et Tech. Marseille St Jérôme. Université Aix-Marseille 3.
- El Hamrouni A. et Loisel R., 1979 - Les groupements de Djebels Boukornine et Ressay. Notes phytosociologiques Nord-africaines. Contribution à l'étude de la tetracliniaie tunisienne. Ecolo. Medit. n°4 ; 133-139.
- El Hamrouni A. 1978 - Etude phytoécologique et problème d'utilisation et d'aménagement dans les forêts de pin d'Alep de la région de Kasserine (Tunisie centrale). Th. Doct_Ing. Fac. Sci. et Tech. Marseille St Jérôme. Université Aix-Marseille 3.
- El Hamrouni A., 1975 - Milieu et évolution de la végétation forestière du Djebel Mrhila. INRF/Projet PNUD/FAO-TUN 71/540-Renforcement et développement de l'INRF.
- El Hamrouni-Aschi K., 2016 - Etude phytosociologique, morphologique et de la diversité des huiles essentielles du Cyprès de Makthar en Tunisie (*Cupressus sempervirens L. var numidica* Trabut). Thèse Doct. en Sci. Agro. Inst. Nat. Agro. Tunis.
- Ferchichi A. 1999 : Contribution à l'étude caryologique, caryosystématique, morphobiologique et écologique de la flore de la Tunisie présaharienne. Thèse ès Sci., Fac Sci. Univ. Tunis II
- Froment D. et Van Swinderen H., 1966 - Méthodologie utilisée pour l'établissement des cartes physiologiques de la végétation *in* : *Projet de planification rurale intégrée de la Tunisie centrale*. Secrétariat d'Etat au Plan et à l'Economie Nationale, Sous-secrétariat d'Etat à l'Agriculture. Tunis.
- Gammar A.M., 1979 - Etude et carte écologique de la région de la Kessera (Dorsale tunisienne). Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Grenoble.
- Garchi S., 1992 - Approche multidimensionnelle de la typologie et de la cartographie des stations à Pin d'Alep de la région de Touiref (Tunisie septentrionale). Thèse Doct. en Eaux et Forêts, Fac. Sci. Agro. Univ. Cath. Louvain.
- Ghrabi-Gammar Z. (Mme) 1999 - Contribution à l'étude biosystématique et taxinomique des lupins de Tunisie. Perspective de leur mise en culture. Thèse Doct. en Sci. Fac. Sci. Tunis, Univ. Tunis II. Texte 144p. + Annexes.
- Gehu J.M. et Gehu Franck J, 1986 - Données synsystématiques et synchronologiques sur la végétation du littoral tunisien de Bizerte à Gabès. Documents phytosociologiques N.S. Vol. X(III) 127-135 + cartes.
- Guinochet M., 1980 - Essai sur quelques syntaxons des *Cisto-Rosmarinetea* et des *Quercetea ilicis* d'Algérie et de Tunisie. *Phytocoenologia* 7 : 436-466.
- Guinochet M., 1977 - Contribution à la synsystématique des pelouses thérophytiques du Nord de la Tunisie et de l'Algérie. Colloques phytosociologiques VI "les pelouses sèches" 1-23.

- Guinochet M., 1973 - Phytosociologie. Masson édit. Paris
- Guinochet M., 1951 - Contribution à l'étude phytosociologique du Sud tunisien. Bull. Soci. Hist. Nat. Afr. du Nord, 42 : 131-153.
- Gounot M., et Schoenenberger A., 1966 - avec la collaboration de Soler A., 1967 - Les unités forestières, in : notice détaillée de la carte phytoécologique de la Tunisie septentrionale, échelle 1/200 000ème sous la direction scientifique de M. Gounot et A. Schoenenberger ; Feuilles IV et V. Ann. INRAT, Vol.40, fasc. 2.
- Le Houérou H.N., 1969 - La végétation de la Tunisie steppique avec référence aux végétations analogues d'Algérie de Libye et du Maroc. Thèse présentée à la faculté des sciences de l'Université de Marseille (St Jérôme). Ann. INRAT vol 42, fasc. 5.
- Le Houérou H.N., 1959 - *Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale*. Université d'Alger, Institut de recherches sahariennes, mémoire n°6.
- Loisel R., et Gomila H., 1992 - Traduction des effets du débroussaillage sur les écosystèmes forestiers par un indice de perturbation. *Ann. Sci. Nat. de Toulon et du Var*.
- Mokni R., 2017 - (Communication verbale) sur la présence du chêne-liège à Jbel Mrhilla.
- Long G., 1954 - Contribution à l'étude de la végétation de la Tunisie centrale. Ann. Serv. Bota. et Agro.Tunisie, Vol.27, pp. 1-388.
- Ozenda P., 1975 - Sur les étages de végétation dans les montagnes du bassin méditerranéen. Doc. et carto. écolo., Grenoble. Vol XVI ; 1-32.
- Quezel P., 1979 - La région méditerranéenne et ses essences forestières ; signification écologique dans le contexte méditerranéen. *Forêt méditerranéenne*. T 1. 7-12
- Quezel P., 1974 - Cours de DEA en écologie méditerranéenne sur les écosystèmes forestiers méditerranéens. Fac. Sci. et Tec. Marseille St Jérôme. Université Aix-Marseille 3.
- Quezel P., Barbero M., Benabid A., Loisel R., et Rivas Martinez S., 1992 - Contribution à la connaissance des matorrals du Maroc oriental. *Phytocoenologia* 21(1-2) : 117-174.
- Rivas Martinez S., 1980- Les étage bioclimatiques de la Péninsule Ibérique. Anales del Jardin botanico de Madrid.
- Rivas Martinez S., 1975 - La végétacion de la classe *Quercetea ilicis* en Espana y Portugal. *An. Inst. Bot. A.J. Cavanilles* 31(2) : 205-259
- Tlili N., 2016 - Vulnérabilité et tolérance de la subéraie tunisienne face aux changements climatiques : réponse stratégique au stress hydrique, variabilité stationnelle et diversité génétique en Kroumirie et dans les zones reliques. Thèse Doct. Sci. agro. Inst. Nat. Agro. Tun.
- Vanden Berghen C. 1990 : Observations sur le Djebel Bou Korbous (Cap Bon, Tunisie septentrionale). Documents phytosociologiques S.N. Vol XII 123-136.

Annexe

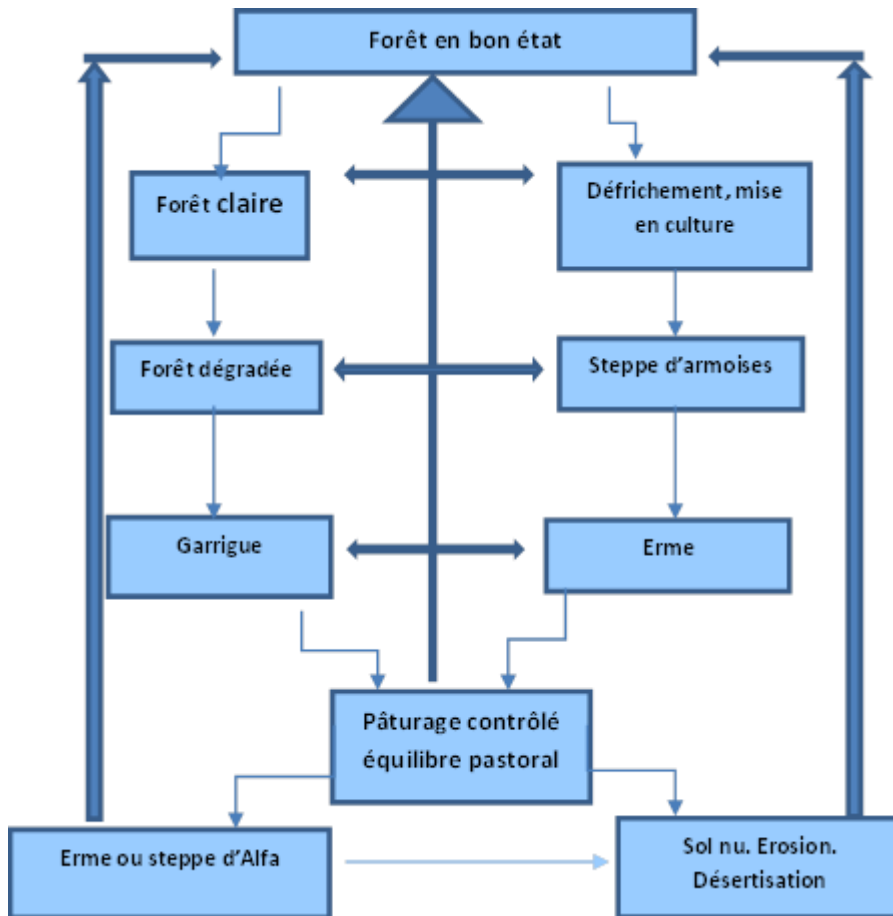


Figure 1 : Stades de dégradation et de remise en état de la forêt de pin d'Alep (d'après A. El Hamrouni 1978 modifiée).

→ : Evolution régressive (incendies, coupes, défrichements, surpâturage).

→ : Evolution progressive (reboisement, mise en défens, semis direct ou régénération naturelle, protection et gestion rationnelle)

CHAPITRE 5

Caractérisation écophysiological du pin d'Alep en Tunisie

Sondes Fkiri, Hanene Ghazghazi, Mokhtar Baraket, Sameh Chérif,
Mohamed Larbi Khouja et Zouhair Nasr

Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), B.P. 10, 2080 Ariana
Université de Carthage, Tunisie

Email: sondesfkiri@gmail.com

Résumé. L'acquisition des connaissances sur les caractères éco-physiologiques ou les traits hydrauliques expliquant et évaluant l'adaptation des plantes à un environnement en constante évolution, est nécessaire pour la sélection des espèces végétales. Dans l'actuelle étude, nous nous sommes intéressés à la détermination des stratégies adaptatives du pin d'Alep mises en place pour faire face à la sécheresse. Il s'agit plus précisément d'une compilation des principaux travaux effectués sur des traits physiologiques en rapport avec les échanges gazeux et les propriétés hydrauliques de cette espèce. La synthèse de ces travaux nous a permis de comprendre que cette espèce réagit différemment selon les caractéristiques écologiques du milieu et l'origine géographique. D'une manière générale, nous avons remarqué que le pin d'Alep se caractérise par une grande variabilité intra-spécifique concernant l'assimilation photosynthétique contrôlée par la fermeture stomatique. Il a été montré aussi que l'espèce est plus efficiente en eau sous des bioclimats humide et sub-humide en comparaison avec le semi-aride. Une concentration interne de CO₂ (C_i) élevée induit l'augmentation de la photosynthèse nette du pin d'Alep, cependant il est incapable d'ajuster son taux d'assimilation de carbone à une irradiation plus élevée. On a constaté également que les solutés organiques (sucres, proline) augmentent sous l'effet de stress hydrique.

Mots clés : Sécheresse, adaptation, Pin d'Alep, *Pinus halepensis*, Tunisie.

Abstract. Ecophysiological characterization of Aleppo pine in Tunisia. The acquisition of knowledge on the eco-physiological characteristics or hydraulic features explaining and evaluating the adaptation of plants to an ever-changing environment is necessary for future plant breeding programs. In the current study, we are interested to determine the adaptive strategies of the Aleppo pine set up to cope with drought. It is more specifically a compilation of the main works carried out on physiological traits related to the gas exchange and the hydraulic properties of this species. The synthesis of this work has allowed us to understand that this species reacts differently according to the ecological characteristics of the study site and the geographical origin. We have noticed that Aleppo Pine is characterized by a great intra-specific variability regarding photosynthetic assimilation controlled by stomatal closure. It has also been shown that the species is more efficient in water under moist and sub-humid bioclimates compared to the semi-arid. A high internal CO₂ (C_i) concentration induces the increase in net

photosynthesis of Aleppo pine, however it is unable to adjust its carbon uptake rate to higher irradiation. It has also been found that organic solutes (sugars, proline) increase under the effect of water stress.

Keywords: Drought, adaptation, Aleppo pine, *Pinus halepensis*, Tunisia

1. Introduction

Le pin d'Alep est largement répandu dans le pourtour méditerranéen, ses forêts occupent au total plus de 3,5 millions d'hectares (Le Houerou, 2005). Son optimum se situe en bioclimats semi-aride et sub humide, aux étages thermo et méso-méditerranéen. Il tolère à la fois de très faibles précipitations annuelles et un déficit hydrique estival accusé et persistant. Ce pin présente par ailleurs, des exigences écologiques très importantes pour des productivités faibles mais acceptables (Pardé, 1957), ce qui a entraîné les forestiers à l'utiliser à très grande échelle comme essence de reboisement (Barbero et Quézel, 1990). Les pays du Maghreb constituent la zone où l'espèce offre son plus grand développement puisqu'on la rencontre à peu près partout sur les massifs montagneux, à l'exception du Maroc Atlantique ainsi que des zones littorales du Tell constantinois et de Kroumirie. En Tunisie, cette espèce colonise essentiellement les montagnes de la dorsale tunisienne. Elle domine toutes les autres essences forestières (résineuses et feuillues), qu'elles soient naturelles ou artificielles et s'étend sur une superficie de 361 221 ha avec un peu plus de 53 % de l'ensemble de la surface forestière (DGF, 2010). La majorité des forêts du pin d'Alep sont situées au Centre et au Nord-Ouest de la Tunisie, principalement à Kasserine, au Kef, à Séliana et à Zaghouan (Khouja, 1997). Il est présent dans les bioclimats aride, semi-aride, sub humide et humide dans les deux variantes fraîche et tempérée (Khouja, 1997). On le trouve sur des sols très variés et se distingue par une forte tolérance vis-à-vis du calcaire actif. Par ailleurs, il est très utilisé comme espèce de reboisement dans plusieurs régions de la Tunisie, du Nord (Bizerte) au Sud (Gabès) et représente près du cinquième de toutes les plantations artificielles réalisées depuis l'indépendance.

Cependant, les accidents climatiques récents ont montré qu'on risque de franchir rapidement des seuils critiques en termes de bilan hydrique, et que l'équilibre entre le climat, le sol et la topographie peut être modifié. Depuis la canicule de 2003, la croissance du pin d'Alep a enregistré des signes de ralentissement (Vennetier, 2010 ; 2015). En effet, le déficit en eau est le principal facteur limitant la production végétale dans le monde (Boyer, 1982 ; Flexas *et al.*, 2004) et la sécheresse est un important moteur des adaptations physiologiques chez les plantes. Le réchauffement climatique devrait augmenter la demande en eau atmosphérique. Toutefois, les changements ne se limiteront pas à l'augmentation de la température moyenne, mais comprendront également une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses (Christensen *et al.*, 2007 ; Seager *et al.*, 2007 ; Sterl *et al.*, 2008). Le sort de nombreux écosystèmes forestiers dépendra du rapport entre la vitesse des changements climatiques et le taux d'adaptation à de tels changements. Face à ces scénarios climatiques, quels mécanismes physiologiques peut développer le pin d'Alep pour résister à la sécheresse?

2. Cadre expérimental

En Tunisie, quelques études ont été effectuées sur le pin d'Alep afin de caractériser les mécanismes physiologiques de résistance à la sécheresse de cette espèce à l'échelle inter et intra-spécifique. Dans le présent chapitre, nous rapportons les principaux résultats des études faites soit sur le peuplement naturel de Jbel Mansour (El Fahs) d'âge inconnu et sur les plantations expérimentales : Henchir Naam (Le Krib), Jbel Abederrahmen (Cap Bon), Souiniet (Ain Drahem) plantées en 1964. Ces sites sont, localisées dans différentes régions de la Tunisie aux conditions pédoclimatiques contrastées (tableau.1).

Tableau 1 : Coordonnées géographiques et caractéristiques écologiques de différents sites.

Arboretum	Gouv.	Lat. (N°)	Long. (E°)	Alt. (m)	Pluv. (mm)	Bioclt	Type de sol	D (cm)	H (m)
Henchir Nâam	Siliana	35°48'	9°45'	450	509	SA sup. hiv temp.	Marno-calcaire	14,7	9
Jbel Mansour	Fahs	36°15'	9° 47'	637	450	SA sup. hiv doux	Marno-calcaire	15,3	7
Jbel Abderrahmen	Nabeul	36°40'	8°57'	255	496	SH	Argileux hydromorphe	15,0	8
Souiniet	Ain Drahem	35°54'	8°48'	492	1140	H	Sablo-Argileux	30	17

Gouv. : Gouvernorat ; Lat. : Latitude ; Long : Longitude ; Alt : Altitude ; Bioclt : Bioclimat ; SA : Semi Aride ; SH : Sub humide ; H : Humide ; D : Diamètre ; H : Hauteur.

Les mesures effectuées ont concerné plusieurs paramètres physiologiques dont principalement:

- Les échanges gazeux : la photosynthèse et les paramètres qui y sont associés, ainsi des courbes d'action de lumière et de concentration interne du CO₂ (Ci) sur la photosynthèse, ont été mesurés à l'aide d'un appareil type LiCor-6400 (portable gaz exchange system, LI-COR Lincoln, Nebraska, USA) (Von Caemmerer et Farquhar, 1981). Durant l'expérimentation, l'humidité relative est maintenue autour d'une valeur moyenne de 50 à 60% et la température est fixée à 25°C ;
- Les traits hydrauliques (Ks et KI) ont été mesurés en utilisant la méthode HPFP (High Pressure Flow Meter) (Sack *et al.*, 2002 ; Tyree *et al.*, 2005) ;
- Le taux des sucres totaux et de la proline dans les aiguilles excisées soumises à la déshydratation et dans les rameaux en place sur de jeunes plants soumis à la sécheresse par arrêt d'irrigation (El Aouni, 1980).

2. Principaux résultats

2.1. Régulation stomatique

Le pin d'Alep a montré une bonne assimilation photosynthétique corrélée à des faibles valeurs de conductance stomatique. Dans le même contexte, El Aouni (1980) a montré que la conductance des stomates du pin d'Alep et du pin pignon est relativement indépendante de la contrainte hydrique au-dessous d'un certain seuil critique. Il a remarqué aussi que les stomates de pin d'Alep, comparés à ceux du pin pignon, accomplissent leur fermeture dans un gradient de DHI plus étroit (20,6-29,6 %), ce qui dénote une meilleure hydro-réactivité et probablement une meilleure adaptation à la sécheresse. En comparaison avec d'autres espèces de pin, les aiguilles excisées du pin d'Alep, soumises à des dessèchements, ferment leurs stomates à des déficits hydriques nettement plus élevés. Les aiguilles du pin d'Alep ont toujours affiché un meilleur indice de contrôle de la transpiration, autre signe d'une meilleure adaptation de cette espèce à la sécheresse en comparaison avec le pin pignon. A des déficits hydriques modérés, l'ouverture stomatique assure un niveau élevé de photosynthèse. Mais, à des contraintes hydriques plus sévères, une régulation efficace des stomates lui évite des déshydratations. Ce comportement dénote chez le pin d'Alep une meilleure aptitude à éviter le dessèchement. Il a montré aussi par ailleurs, des pertes totales d'eau nettement limitées, ce qui se traduit par un meilleur contrôle de la transpiration et une meilleure efficacité de la régulation stomatique. Les taux d'absorption et de transpiration dépendent de l'espèce, de l'humidité dans le sol, de la demande évaporatoire de l'atmosphère et de la conductance stomatique. Une humidité relative de l'air élevée réduit l'action de la sécheresse édaphique sur la photosynthèse alors qu'une sécheresse atmosphérique renforce cette action.

Une comparaison inter-sites des réponses des échanges gazeux a montré qu'elles varient d'un bioclimat à un autre et d'un type de sol à autre (Figure 1). En effet, les valeurs de photosynthèse les plus élevées ont été enregistrées sous

bioclimats humide (arboretum de Souiniet) et sub humide (arboretum de Jbel Abderrahmen). Ainsi, dans ces deux sites, l'espèce a enregistré les valeurs de conductance stomatique (g_s) les plus faibles, ce qui explique l'importance de leurs assimilations nettes en CO_2 (A_n) par rapport aux deux autres sites (Henchir Naam et Jbel Mansour soumis à un bioclimat semi-aride) (Figure 1). Dans les deux sites de Jbel Mansour et Henchir Naam, la rapidité de la fermeture stomatique est interprétée comme une meilleure adaptation à la sécheresse. Ce résultat est confirmé par celui de Ksontini *et al.*, (1998) pour de jeunes plants de chênes méditerranéens (*Quercus suber*, *Q. faginea*, *Q. coccifera*). Au contraire, une fermeture stomatique plus lente peut traduire une certaine tolérance à la contrainte hydrique, tel est le cas pour le pin d'Alep planté dans les sites de Jbel Abderrahmen et de Souiniet.

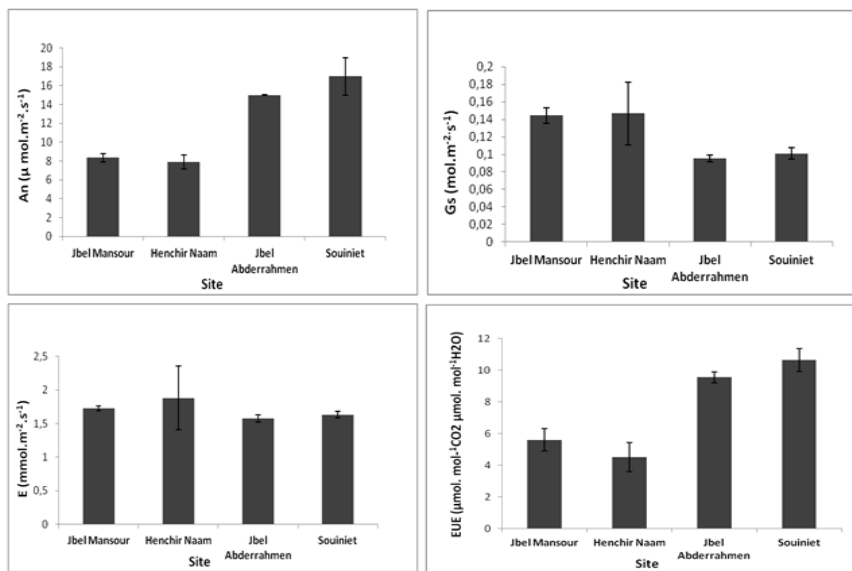


Figure 1 : Photosynthèse nette (A_n), conductance stomatique (g_s), transpiration (E) et efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) sous une concentration de 400 ppm de CO_2 , mesurés dans quatre arboretums de la Tunisie.

Des travaux menés par Aouni (1980) sur le pin d'Alep ont permis de mettre en évidence que l'économie de l'eau et la résistance de l'appareil

photosynthétique au déficit hydrique, résidant dans la régulation stomatique, est parmi les facteurs de résistance à la sécheresse. La disponibilité en eau est la principale contrainte climatique agissant sur la végétation méditerranéenne, cette contrainte risque de se renforcer avec la diminution des précipitations et l'augmentation des températures.

2.2. Efficience de l'utilisation de l'eau

Le pin d'Alep dans le site expérimental de Henchir Naam (semi-aride) est le moins efficient de point de vue utilisation de l'eau (EUEi). Par contre, il présente une bonne EUEi dans le site de Souiniet (humide) et de Jbel Abderrahmen (subhumide). Plusieurs études dont celles de Heth et Kramer (1975) et Aussenac et Granier (1978) ont montré que le contrôle de l'état hydrique varie selon les espèces et selon les conditions pédoclimatiques du site où l'espèce est plantée. Le stress hydrique a été rapporté comme un facteur contrôlant la croissance des espèces de pin en Tunisie. En effet, en début de saison sèche, sous des bioclimats humide et subhumide et sur un sol argileux, le pin d'Alep a montré un contrôle très tardif de la perte en eau. Cependant, sur un substrat calcaire et sous un bioclimat semi-aride, l'espèce a recours à un contrôle précoce de la perte en eau afin d'éviter le stress hydrique. El Khorchani *et al.*, (2007) ont montré que la croissance radiale du pin d'Alep en Tunisie est positivement corrélée avec les précipitations des mois d'avril, mai et juin, où le déficit en eau devient de plus en plus aigu au cours et au début de la saison de végétation.

2.3. Photosynthèse nette (A_n) en fonction de la concentration intercellulaire du CO_2 (C_i)

El Aouni (1980) a montré que sous contraintes hydriques modérées, la baisse de la photosynthèse est liée à d'autres facteurs que la fermeture des stomates. En effet, l'espèce a montré une baisse de la conductance interne en CO_2 , ce qui explique la baisse initiale du CO_2 . La baisse rapide de la conductance interne en CO_2 a lieu pour un déficit hydrique interne croissant avec l'âge foliaire. En absence de carence hydrique, l'ouverture photoactive des stomates est contrôlée par C_i .

Par ailleurs, une étude comparative représentant la courbe A/C_i effectuée sur 3 espèces de pin (*P. halepensis*, *P. pinea* et *P. brutia*) dans l'arboretum de Jbel Abderrahmen rattaché au bioclimat Sub humide (Figure 2) a montré une phase d'augmentation intense de A_n chez le pin d'Alep en fonction des fortes concentrations de C_i jusqu'à atteindre des valeurs d'assimilation maximales ($A_{max}=25\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) et des valeurs de A max moins élevées chez les deux autres espèces. La courbe montre aussi qu'une concentration interne de CO_2 élevée induit l'augmentation de la photosynthèse nette du pin d'Alep, une telle augmentation est susceptible de stimuler fortement la production végétale (Kirschbaum et Fischlin., 1996). Par comparaison avec les deux autres espèces, la limitation stomatique est faible chez le pin d'Alep ce qui se traduit par un taux de photosynthèse plus élevé (Fkiri *et al.*, 2018). Cependant, la stimulation maximale de la photosynthèse n'est pas maintenue à long terme, notamment en raison de l'existence d'un contrôle interne de la photosynthèse par la capacité d'utilisation de carbone au niveau des sites de croissance (Figure 2). En effet, pour des valeurs critiques de C_i , la photosynthèse est limitée par l'activation de Rubisco et la limitation stomatique. D'après plusieurs auteurs (Vivin *et al.*, 1996 ; Long et Drake, 1992 ; Long *et al.*, 2004 ; Erismann *et al.*, 2006), la limitation stomatique peut diminuer le flux de transpiration de la vapeur d'eau et aussi le flux diffusif de CO_2 entrant dans les feuilles.

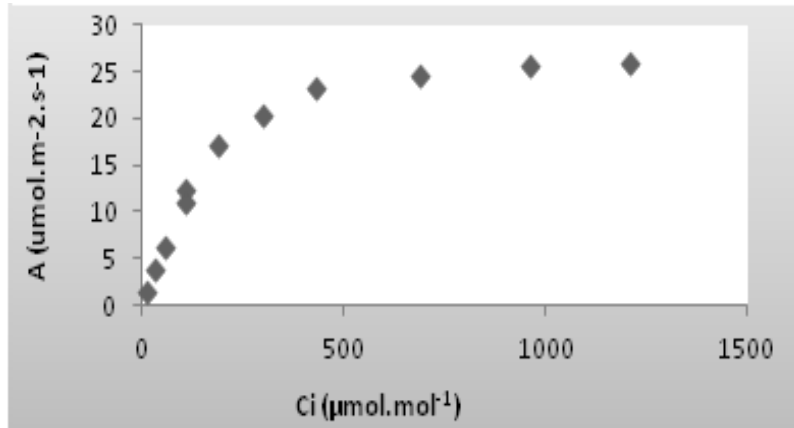


Figure 2 : Réponse de la photosynthèse nette (A_n) en fonction de la concentration intercellulaire du CO_2 (C_i) au site expérimental de Jbel Abderrahmen.

2.4. Action de la lumière sur la photosynthèse nette

L'étude de l'effet de l'augmentation de l'intensité lumineuse sur la photosynthèse a été effectuée sur trois espèces (*Pinus halepensis*, *P. pinea* et *P. brutia*) dans l'arboretum de Souiniet (Figure 3). Elle a montré que l'acclimatation aux fluctuations de la lumière joue un rôle crucial pour déterminer la capacité compétitive des essences forestières (Grassi & Bagnaresi, 2001). En effet, une intensité de lumière élevée peut être considérée comme un facteur de stress dans les écosystèmes méditerranéens. Par ailleurs, sous faibles radiations ($\text{PAR} < 300$), l'assimilation du carbone est faible alors que pour une radiation moyenne ($\text{PAR} = 300$ à 1000), A_n augmente rapidement. Sous fortes radiations ($\text{PAR} > 1000$), A_n se stabilise et se maintient aux alentours de $6,87 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ chez le pin d'Alep. La lumière au point de saturation (LSP) est de l'ordre de $1600 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$. L'espèce est moins tolérante à une radiation élevée, elle présente de sévères restrictions à l'échange gazeux et à la performance de la photosynthèse.

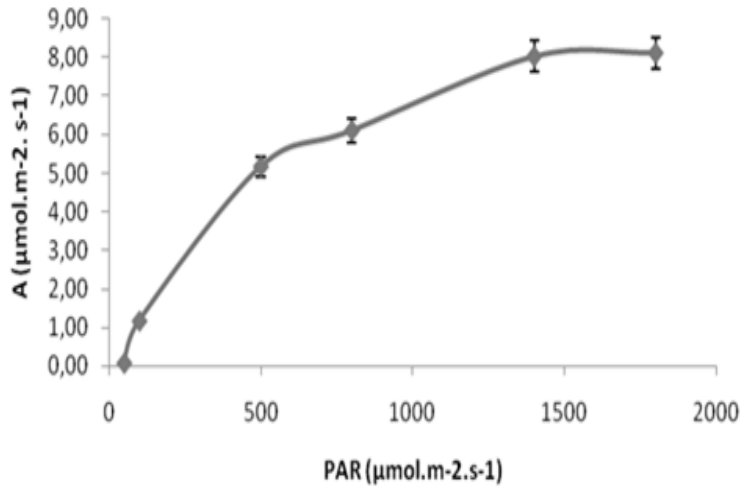


Figure 3: Courbes de l'action de l'intensité lumineuse sur la photosynthèse des aiguilles du pin d'Alep âgé de 51 ans.

L'acclimatation des plantes à des conditions de forte luminosité est apparue dans la capacité à utiliser efficacement des densités de flux de photons photosynthétiques élevées (Sun *et al.*, 2016). Cela suggère que le pin d'Alep sous un bioclimat humide ne peut pas bénéficier davantage de conditions de forte luminosité, le même comportement a été observé chez le chêne liège dans la région de Feija (Rzigui, 2015). L'incapacité du pin d'Alep à ajuster son taux d'assimilation de carbone photosynthétique à une irradiation d'intensité plus élevée pourrait être liée à une faible acclimatation à la lumière de la teneur en chlorophylle. El Aouni (1980) a montré que le rendement quantique maximum de la photosynthèse chez le pin d'Alep augmente au cours de la première année de la vie des aiguilles, puis diminue progressivement au cours du vieillissement. Par contre, chez le pin pignon, il demeure plus au moins stable au cours de la vie de la feuille. Cette différence s'explique par des différences de vitesse du processus photochimique (différences d'efficacité quantique). L'efficacité biochimique brute baisse progressivement avec l'âge foliaire. La courbe d'action de la lumière montre que la saturation est très progressive, quel que soit l'âge des aiguilles ce qui confirme bien le caractère héliophile de l'espèce. Néanmoins, pour atteindre leur photosynthèse maximale, les aiguilles du pin pignon exigent un niveau

d'énergie lumineuse supérieur à celui exigé par les aiguilles du pin d'Alep. Ces résultats montrent que l'influence de l'activité des chloroplastes sur la photosynthèse au niveau des feuilles est fondamentalement différente entre les espèces de pin et qu'un tel caractère serait probablement en relation avec l'épaisseur des aiguilles.

3. Vulnérabilité du xylème et des traits hydrauliques

La vulnérabilité du xylème et des traits hydrauliques est un paramètre clé pour explorer la résistance des arbres face à une sécheresse. Cela peut avoir des implications importantes pour la gestion des forêts (naturelles ou artificielles) et pour l'adaptation des espèces au changement climatique. La valeur de P50, correspondant à la pression du xylème à 50% de perte de conductance, a été retenue comme un critère important pour représenter un seuil de rupture dans le transport de l'eau de la plante (Choat, 2013 ; Urli *et al.*, 2013 ; Meinzer *et al.*, 2009). Le P50 demeure la valeur qui est habituellement utilisé comme indice de résistance à la rupture hydraulique lors d'épisodes de sécheresse intense. En comparant des espèces ligneuses méditerranéennes avec d'autres espèces tempérées (Figure 4), Bréda *et al.*, (2006) ont montré que *Pinus halepensis* présente une résistance à la vulnérabilité plus importante que celles de *Pinus pinaster* et de *Pinus nigra* dont le P50 est plus faible.

En Tunisie, des travaux effectués sur la variabilité écophysiological intra-spécifique du pin d'Alep dans différents sites expérimentaux (Jbel Mensour, Henchir Naam, Souiniet) ont prouvé que Ks et KI, considérés comme traits essentiels pour réguler les tensions et les pertes d'eau, augmentent sous l'effet de stress hydrique.

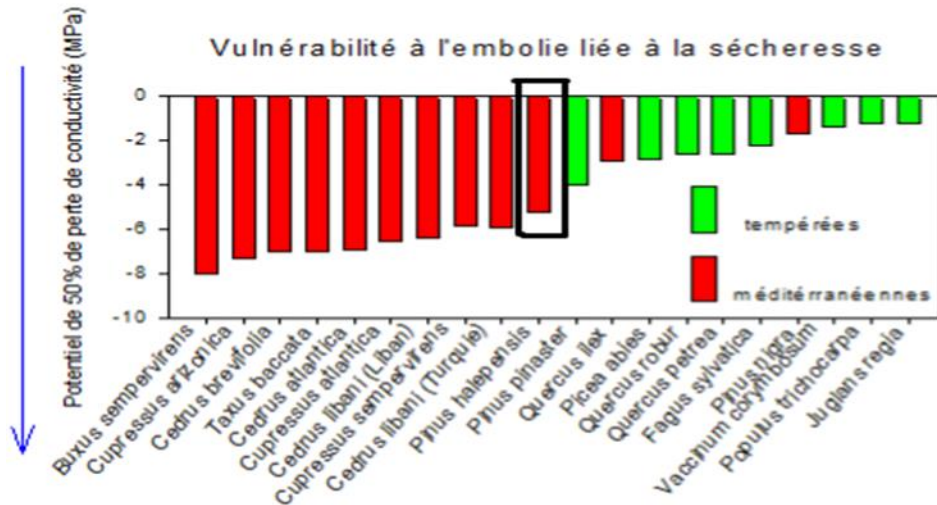


Figure 4 : Comparaison de la valeur de P50 chez différentes espèces.

4. Teneur en sucres totaux et proline

L'accumulation de la proline est une des stratégies adaptatives déclenchées par la plante face aux contraintes de l'environnement (Belkhodja et Benkabilia, 2000). La proline s'accumule généralement en présence d'un stress hydrique (Hubac et Viera Da Silva, 1980), d'un stress salin (Stewart et Lahrer, 1980) et sous l'effet de basses ou de hautes températures (Paleg *et al.*, 1981). Habituellement, c'est durant les saisons printanière et estivale, qu'on remarque une accumulation significative de cet acide aminé, cette augmentation pourrait être attribuée au développement des plantes pendant ces deux saisons et à leurs besoins en composés azotés dont la proline. En effet, en cas de besoin, la proline représente l'un des composés les plus facilement mobilisables. Le Pin d'Alep dans le site expérimental de Henchir Naam – Le Krib a montré une accumulation en sucres et en proline très importante en particulier pendant la saison sèche (Jomni *et al.*, 2017). Cependant, il peut y avoir des différences de comportement au sein de la même espèce. Ceci a été vérifié par une autre étude réalisée sur deux provenances (Bizerte et Weslatia) dans le même site expérimental de Henchir Naam – Le Krib. Cette étude a révélé que la quantité en

proline accumulée par la provenance Bizerte est significativement plus élevée à celle accumulée par la provenance Weslatia (Tableau 2). D'après Slama (2002), les teneurs en proline et en sucres sont plus élevées en cas de déficit hydrique, en particulier, chez les génotypes les plus résistants à la sécheresse. Généralement, l'accumulation de la proline libre est un indice du processus d'ajustement osmotique qui est important pour l'adaptation au stress cellulaire de nombreuses espèces végétales (Morgan, 1984).

Tableau 2: Teneurs en sucre et en proline (mg /g MS) des feuilles de deux provenances de pin d'Alep (Bizerte et Weslatia) dans le même site expérimental de Henchir Naam – Le Krib.

	Weslatia	Bizerte
Proline	5,49±0,39	9,22±0,71
Sucres	43,50±0,72	44,20±1,92

Au printemps, le pin d'Alep est plus riche en sucres solubles qu'en proline par contre en saison sèche, cette situation se trouve inversée. Ceci est en concordance avec les résultats trouvés par Laala *et al.* (2013) pour la même espèce. L'accumulation de ces solutés organiques (sucres, proline) n'est autre qu'un phénomène d'adaptation à la sécheresse permettant à l'espèce d'assurer normalement ses fonctions physiologiques.

5. Conclusion

L'acquisition de meilleures connaissances, expérimentalement prouvées, sur les exigences écophysiological des espèces en relation avec leur potentiel d'adaptation aux conditions écologiques et climatiques de notre pays est plus que nécessaire dans la mesure où elle permet d'orienter vers un meilleur choix d'espèces ou de provenances physiologiquement plus efficaces et par conséquent mieux adaptées aux conditions édaphoclimatiques du milieu. Dans cette étude, on a essayé de rapporter les résultats des principaux travaux

écophysiological sur le pin d'Alep afin de caractériser son comportement et ses mécanismes d'adaptation face à la sécheresse. En effet, il est important de comprendre comment cette espèce répond au déficit hydrique au niveau intraspécifique pour mieux définir des critères de sélection appropriés pour le choix des provenances plus performantes en termes de productivité et d'adaptation aux conditions défavorables du milieu. Les recherches en écophysiological sur le pin d'Alep ont permis de révéler une forte variabilité intraspécifique dans ses réponses à la contrainte hydrique. Il ressort aussi que cette espèce tend à contrôler ses pertes en eau dans des conditions déficientes par régulation stomatique et osmotique, ce qui permet d'expliquer dans certaines mesures la faiblesse de sa productivité.

Références bibliographiques

- Aussenac G, Granier A (1978). Quelques résultats de cinétiques journalières du potentiel de sève chez les arbres forestiers. *Ann. Sci. For.*, 34: 256-284.
- Belkhouja M (2000). Proline response of faba bean (*Vicia faba* L.) under salt stress. *Egypt J. of Agric. Res.*, 78 (1), 185-195.
- Boyer JS (1982). Plant productivity and environment. *Science*. 218: 443-448.
- Breda N, Huc R, Granier A, Dreyer E (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.* 63, 625-644.
- Christensen JH, Carter TR, Rummukainen M, Amanatidis G (2007). Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Clim. Change*, doi:10.1007/s10584-006-9211-6.
- DGF (2010). Inventaire national Forestier et pastoral. Ministère de l'Agriculture, Tunis, 88p.
- El Aouni MH (1980). Processus déterminant la production du pin d'alep (*Pinus halepensis* Mill.): photosynthèse, croissance et répartition des assimilats. Thèse de Doctorat. Etablissement : Université Paris VII, Centre de Jessieu.
- El Khorchani A., Claude Gadin-Henry, Sadok Bouzid, Abdelhamid Khaldi., (2007). Impact de la sécheresse sur la croissance de trois espèces forestières en Tunisie (*Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinea* L. et *Pinus pinaster* Sol.), 18: 113-21.
- Choat B. 2013. Predicting thresholds of drought-induced mortality in woody plant species. *Tree Physiology* 33: 669–671.
- Fkiri S, Rzigui T, Elkhorchani A, Ben Hassine A, Ghazghazi H, Khaldi A, Khouja M.L, Zouhair Nasr (2018). Relationship between tree growth and gas exchange of three Mediterranean pines species. *Proceeding in 3rd International Conference on*

- Integrated Environmental Management for Sustainable Development. ISSN: 1737-3638.
- Flexas J, Bota J, Loreto F, Cornic G, Sharkey TD (2004). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants, *Plant Biology*, 6: 269-279.
- Grassi G, Bagnaresi U (2001). Foliar morphological and physiological plasticity in *Picea abies* and *Abies alba* saplings along a natural light gradient. *Tree Physiology*, 21: 959-967.
- Heth D, Kramer PJ (1975). Drought tolerance of pine seedling under various climatic conditions, *Forest Sciences*, 21: 72-82.
- Hubac, C., Vieira, Da Silva, J. Indicateurs métaboliques de contraintes mésologiques. *Physiol. Vég*, 18, 45-53, 1980
- Kirschbaum M. Fischlin A (1996). Climate change impacts on forests. In: Watson, R., Zinyowera, M.C. & Moss, R.H. (eds.), *Climate change 1995 - Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge a.o., 95-129 pp.
- Khouja ML (1997). Variabilité géographique du pin d'Alep en Tunisie-perspective d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois. Thèse de doctorat en science agronomique et ingénierie biologique. U.C.L. Belgique, 181p.
- Ksontini M, Louguet P, Laffray D, Rejeb M N (1998). Comparaison des effets de la contrainte hydrique sur la croissance, la conductance stomatique et la photosynthèse de jeunes plants de chênes méditerranéens (*Quercus suber*, *Q. faginea*, *Q. coccifera*) en Tunisie. *Ann. Science. For*, 55: 477-495.
- Meinzer FC, Johnson DM, Lachenbruch B, McCulloh KA, Woodruff DR, 2009. Xylem hydraulic safety margins in woody plants : coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance, *Functional Ecology*, 23 : 922-930.
- Morgan JM (1984). Osmoregulation and water in higher plants. Wheat conference 2-9 May, Rabat, Morocco. *Annu Rev Plant Physiol*, 35 : 299-319.
- Laala A, Rached-Kanouni M, Alatou D (2013). Les variations thermiques saisonniers et leurs impacts sur le comportement écophysiological des semis de pin d'Alep. *European Scientific Journal* 24 (9):1857-7881.
- Le Houerou H N (2005). Atlas de la répartition de 250 espèces-clés dans le bassin méditerranéen. Montpellier: Le Houerou ed., 220 pp.
- Meinzer FC, Johnson DM, Lachenbruch B, McCulloh KA, Woodruff DR (2009). Xylem hydraulic safety margins in woody plants: coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. *Functional Ecology* 23: 922–930.
- Long SP, Drake BG (1992). Photosynthetic CO₂ assimilation and rising atmospheric CO₂ concentrations. In NR Baker, H Thomas, eds, *Crop Photosynthesis: Spatial and Temporal Determinants*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands, 69–103 pp.
- Paleg LG, Douglas TJ, Van Dali A, Keech, DB (1981). Proline, betaine and other organic solutes protect enzymes against heat inactivation. *Aust. J. Plant Physiol*, 8 : 107-114.

- Pardé (1957). La productivité des forêts de pin d'Alep en France, *Annales de l'École Nationale des Eaux et Forêts – Tome XV Fascicule 2*: 365-414.
- Quézel P, Barbéro M (1992). Le pin d'Alep et les espèces voisines : répartition et caractères écologiques généraux, sa dynamique récente en France méditerranéenne, *Forêt Méditerranéenne*, XIII(3): 158–170.
- Rzigui T, Khiari H, Abbas Z, Ben Baaziz K, Jaouadi I, Nasr Z (2015). Light acclimation of leaf gas exchange in two Tunisian cork oak populations from contrasting environmental conditions. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 8: 700-706.
- Seager (2007). The turn of the century North American draught in the united states Great plains. *J. Climate*, 20: 5527-5552.
- Meinzer FC, Johnson DM, Lachenbruch B, McCulloh KA, Woodruff DR. (2009). Xylem hydraulic safety margins in woody plants: coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. *Functional Ecology* 23: 922–930.

CHAPITRE 6

La fructification des forêts du pin d'Alep en Tunisie

Abdelaziz Ayari

*Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), B.P. 10, Rue Hédi
Karray, 2080 Ariana
Université de Carthage, Tunisie*

Email: abdelazizayari@yahoo.fr

Résumé. En Tunisie, plus que la moitié de la superficie des forêts est couverte par le pin d'Alep. Depuis les années cinquante, les efforts de reforestation étaient orientés uniquement pour la production du bois et la lutte contre l'érosion. Récemment, un autre objectif s'est ajouté et s'est imposé comme objectif prioritaire : c'est la production de graines de pin ou zgougou. La connaissance de l'effet des facteurs écologiques et sylvicoles sur la fructification de l'espèce est fondamentale. Dans ce chapitre, on expose l'influence de divers facteurs écologiques en relation avec les caractéristiques du milieu et de l'espèce tels que: le climat, les coordonnées géographiques, la topographie, la morphologie de l'arbre et la dimension du cône sur les potentialités productives en cônes et en graines. Les résultats sont obtenus à partir de 79 sites relevant de quatre bioclimats qui s'étendent du subhumide au nord jusqu'au semi aride-inférieur (centre du pays). La production en cônes et en graines est optimale pour une densité de 250 arbres/ha. En passant d'une densité de 250 arbres/ha à 1000 arbres/ha ou à 2000 arbres/ha, le rendement en cônes et en graines diminue de moitié voire de trois quarts, respectivement. Par ailleurs, la fructification du pin d'Alep exprimée principalement par la production en cônes et en graines dépend étroitement de l'âge des arbres et des caractéristiques de leurs houppiers et aussi de la densité du peuplement et de la fertilité de la station.

Mots-clés: Pin d'Alep, écologie, sylviculture, production, cônes et graines, forêts, Tunisie.

Abstract. Tunisian Aleppo pine forests fruiting. In Tunisia, more than half of the forest area is covered by Aleppo pine. Since the 1950s, reforestation efforts have focused solely on timber production and erosion control. Recently, another objective has to be added: it is the production of zgougou. However, background of the impact of ecological and silvicultural factors on the species fruiting is fundamental. Within this chapter, the influence of various ecological factors (climate, geography, topography, site characteristics and tree morphology and cone size) on potential cone and seed productivity. Results are obtained from 79 sites studied in four Tunisian bioclimatic zones which extend from the sub-humid in the north to the lower semi arid (center of the country). Cones and seeds yields are optimal for stand density of about 250 trees/ha. An increase of the Aleppo pine stand density from 250 trees/ha to 1,000 trees/ha or 2,000 trees/ha reduces the cone and seed yields to the half or to the quarter. Age effect showed

an affine proportionality with cone and seed production. The age influence on Aleppo pine fruiting is dependent to crown characteristics, density and fertility.

Keywords: Aleppo pine, Ecology, silviculture, production, cones and seeds, forests, Tunisia.

1. Introduction

Les graines du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) représentent un intérêt particulier pour la population tunisienne car elles sont très demandées pour la consommation humaine surtout durant la fête du Moulded (Ayari et Khouja, 2014). Les quantités des graines du pin d'Alep produites chaque année en Tunisie sont estimées entre 300 et 500 tonnes. Cette quantité demeure insuffisante et ne répond pas à la satisfaction de la population tunisienne, d'où l'importation d'un quota additionnel du Maroc et de l'Algérie, estimé entre 20 et 40 tonnes (Shröder *et al.*, 2014). Dans ce chapitre, nous passerons en revue les principaux travaux réalisés sur la production en cônes et en graines dans les forêts naturelles du pin d'Alep en s'intéressant particulièrement à l'étude des différents facteurs écologiques qui influencent la production en cônes et en graines chez cette espèce. Une étude récente a montré que les potentialités fructifères chez cette espèce dépendent de plusieurs facteurs qui influencent directement ou indirectement sa fructification (Ayari, 2012). La production en cônes et en graines peut varier annuellement en fonction des caractéristiques des peuplements et des diamètres des arbres (Ayari *et al.*, 2011 et 2012). En effet, lorsque les conditions écologiques sont favorables, les arbres du pin d'Alep croissent plus en diamètre et offrent, par conséquent, une fructification plus abondante (Vennetier *et al.*, 2010 et 2011). Toutefois, le volume et la taille des cônes mûrs dépendent des conditions du milieu et de l'effet combiné d'autres facteurs environnementaux. La qualité des cônes produits a une influence certaine sur la qualité des graines qu'ils contiennent (Ayari, 2012). Les premiers examens du houppier du pin d'Alep montrent une fructification majoritairement apicale, dominant son tiers supérieur. Le reste du houppier ne comporte que des ramifications feuillées, où la production des cônes est plus rare à l'exception des

peuplements clairs et sur les arbres de lisière ou isolés. Cependant, il peut y avoir un nombre non-négligeable de cônes en position basse sur l'arbre.

2. Effets climatiques et géographiques sur la fructification

2.1. Effet des facteurs climatiques (température et précipitations)

Les recherches qui traitent ces types d'effets sur la fructification des espèces forestières en général et des conifères en particulier sont rares, que ce soit en Tunisie ou ailleurs. Sachant que le cycle reproductif du pin d'Alep (déclenchement-formation-maturité totale des cônes) dure trois années consécutives, il est important de focaliser les efforts sur l'examen de l'effet des précipitations cumulées durant son cycle, comme proposé par Caïn et Shelton (2004) pour deux espèces de pin en Amérique du Nord. En Tunisie, Ayari (2012) a montré l'existence de corrélations significatives entre les précipitations cumulées durant les 33 mois d'un cycle reproductif et le nombre de cônes ($\#C/Arbre$), le poids des graines produites par arbre ($PGr/Arbre$), le poids moyen du cône (PMC) et le poids des graines par cône (PGr/C). La quantité totale des précipitations cumulées entre septembre 2003 et mai 2006 était à l'origine de la variabilité observée pour la production en cônes et en graines dans la zone d'étude, qui couvre quatre sous-étages climatiques, du subhumide au nord du pays jusqu'au semi aride inférieur au centre du pays. Les résultats ont montré que dans les forêts des zones subhumides, les cônes produits sont nombreux et plus lourds et présentent des semences bien chargées en réserves carbonées (Tableau 1). Par contre, les cônes les plus légers (poids moyen de cône (PMC)) avec un contenu en graines moins lourdes (PGr/C) sont observés au niveau des forêts localisées en semi aride supérieur et semi aride moyen. Toutefois, durant cette période étalée sur 33 mois environ avant la récolte, le $\#C/Arbre$ a augmenté de 70 à 160 cônes proportionnellement à l'augmentation des précipitations cumulées de 1322 à 1953 mm (Tableau 1). Cette amélioration représente donc un gain supplémentaire de 90 cônes par arbre pendant cette période, soit une

augmentation d'environ 14 cônes pour chaque 100 mm de pluie additionnelle durant un cycle reproductif.

Tableau 1. Effet des précipitations cumulées [2003-2006] sur le nombre de cônes produits par arbre de pin d'Alep récolté en 2007 (#C/arbre), le poids des graines par arbre (PGr/arbre), le poids moyen du cône (PMC) et le poids moyen des graines par cône (PGr/C) dans les forêts de pin d'Alep en Tunisie.

	Sous étages bioclimatiques			
	SH*	SAS	SAM	SAI
**P _{cumulées} (mm)	1953	1569	1458	1322
#C/arbre (n)	160	115	120	70
PGr/arbre (g)	261,6	117,4	130,3	106,2
PMC (g)	27,2	19,0	19,8	22,9
PGr/C (g)	1,7	1,1	1,2	1,5

*Sous étages bioclimatiques: SH: subhumide, SAS: semi aride supérieur, SAM: semi aride moyen; SAI: semi aride inférieur. Le poids des cônes et des graines est exprimé en gramme (g). ** source: Ayari (2012).

De même, le PGr/Arbre a aussi augmenté de 106,2 g dans le sous étage climatique semi aride inférieur à 261,6 g dans les forêts de pin d'Alep soumise au bioclimat subhumide. Ces valeurs correspondent en moyenne à un gain de 24,6 g pour chaque tranche de 100 mm de précipitations supplémentaires au cours des trois saisons de croissance précédant la récolte. Les mêmes tendances ont été observées avec le poids moyen du cône (PMC) et le poids des graines par cône (PGr/C), où un cône mûr offre un poids moyen individuel (PMC) plus élevé en subhumide, (27,2 g), suivi immédiatement par celui du semi aride inférieur (22,9 g). Les valeurs les plus faibles ont été observées dans les forêts localisées dans le semi aride supérieur et le semi aride moyen. Ces résultats peuvent être expliqués par les fortes densités rencontrées dans les forêts du semi aride supérieur et moyen en comparaison avec celles des forêts du subhumide et du semi aride inférieur (Ayari *et al.*, 2011). Un meilleur remplissage du cône en graines a été observé en subhumide, avec un poids moyen de 1,7 g suivi par celui observé en semi aride inférieur, avec un poids moyen de 1,5 g. Ces valeurs correspondent à une augmentation respective de 0,7 g/C et 0,03 g par 100 mm de précipitations. Ces résultats montrent l'importance du potentiel productif en

graines, ce qui permet d'orienter les futures plantations du pin d'Alep vers des objectifs plus appropriés, pour la production des graines en bioclimat subhumide et pour la production du bois dans les autres étages bioclimatiques.

2.2. Effet des gradients géographiques (latitude, longitude, altitude et exposition)

Les forêts de pin d'Alep étudiées se trouvent dans les limites latitudinales comprises entre 35,2°N et 36,6°N soit un gradient latitudinal qui représente théoriquement un déplacement de 116 km du sud au nord du pays à vol d'oiseau. Selon Ayari (2012), le gradient latitudinal n'a affecté que le nombre des graines produites par cônes (#Gr/C) et le nombre des graines produites par hectare (#Gr/ha). D'après le modèle de prédiction affiché dans le tableau 2, une progression latitudinale vers le nord entraîne une augmentation de 75 à 94 graines par cône (#Gr/C), l'équivalent de 24,3 kg/ha et 88,2 kg/ha respectivement, ce qui correspond en termes de gain de production en graines à 7,2% pour 100 km parcourus vers le nord. En revanche, le poids des graines n'est pas corrélé à la latitude. De point de vue longitude, les forêts de pin d'Alep étudiées s'étendent depuis la frontière algérienne (8,33°E) jusqu'à la côte orientale (9,85°E), soit sur une distance de 137 km environ à vol d'oiseau. Un tel gradient a eu un effet significatif décroissant sur la taille des cônes (largeur (LaMC) et longueur (LoMC) des cônes) et le poids moyen des graines (PMC) par cône. (Tableau 2). En effet, pour un déplacement de 100 km vers l'Est, on enregistre une réduction de la taille du cône de l'ordre de 3,3% sur la largeur (LaMC), de 9,3% sur la longueur (LoMC) et aussi une diminution de 7,77% pour le poids des graines par cône (PMC) et de 5,5% pour le poids moyen d'une graine (PMIGr), Nasri *et al.* (2004) ont abouti aux mêmes déductions bien que leurs travaux soient réalisés dans une gamme longitudinale plus restreinte.

Tableau 2. Effet des gradients géographiques sur le nombre de graines produites par cône (#Gr (n)), par hectare (#Gr (n x 10⁶)), sur la dimension moyenne d'un cône (largeur (LaMC (mm), longueur (LoMC (mm))), poids (PMC (g)), sur le poids moyen individuel d'une seule graine (PMIGr (mg))), sur le nombre de cônes/arbre (#C (n)) et le poids des graines/arbre (PGr), dans les forêts du pin d'Alep en Tunisie.

Paramètre	Modèle de prédiction	P>Fr
Latitude (°N)	#Gr/C (n) = 14 Latitude - 418	r = 0,31**
	#Gr/ha (n x 10 ⁶) = 6 Latitude - 208	r = 0,45**
Longitude (°E)	LaMC (mm) = -3,00 Longitude + 57,85	r = -0,55***
	LoMC (mm) = -8,34 Longitude + 141,91	r = -0,48***
	PMC (g) = -7,00 Longitude + 84,23	r = -0,53***
	PMIGr (mg) = -4,96 Longitude + 60,54	r = -0,66***
Altitude (m)	LaMC (mm) = 0,004 Altitude + 27,958	r = 0,37***
	LoMC (mm) = 0,007 Altitude + 61,050	r = 0,24***
	PMC (g) = 0,009 Altitude + 14,78	r = 0,38***
	PMIGr (mg) = 0,005 Altitude + 12,31	r = 0,38***
Exposition (°)	#C/arbre (n) et PGr/arbre (g): tendance à la hausse pour les expositions sud, sud-est, nord-est, nord-ouest.	NS

**p<0,01; p<0,001. NS: non significatif.

Par analogie, une élévation altitudinale de 250 m à 1185 m est accompagnée par une augmentation de la largeur moyenne du cône (LaMC) de 28,96 mm à 32,70 mm, de la longueur moyenne d'un cône (LoMC) de 62,80 mm à 69,35 mm, le poids moyen du cône (PMC) de 17,03g à 25,45g, le poids moyen individuel de la graine (PMIGr) de 13,56 mg à 18,24 mg. Pratiquement, toute élévation du terrain devrait conduire à des cônes plus lourds avec un gain en poids moyen individuel en cônes et en graines. En revanche, toute élévation de 100m d'altitude se traduit par des augmentations d'environ 0,4 mm pour la LaMC, 0,7 mm pour la LoMC, 0,9 g pour le PMC et 0,5 mg pour le PMIGr. Ces résultats confirment les résultats obtenus dans les forêts du pin d'Alep au Maroc par Boulli *et al.* (2001). La longueur et le poids moyen du cône sont les paramètres les plus affectés par l'élévation de l'altitude, en se basant sur les gains enregistrés. Ces gains peuvent être attribués aux meilleures conditions

climatiques (forte humidité et faible température) des sites correspondants, susceptibles d'accroître la photosynthèse et d'améliorer le développement des cônes. Cependant, des investigations complémentaires devraient être menées pour mieux cerner l'effet de chacun des facteurs physiques sur la production en cônes et en graines. Par ailleurs, aucune corrélation significative n'a été retrouvée concernant l'effet de l'exposition du site forestier sur le nombre de cônes par arbre (#Co/ATM) et sur le poids des graines par arbre (PGr/ATM). De même, la topographie du site n'a affecté ni la taille du cône, ni le poids moyen individuel de la graine (PMIGr). Manifestement,, une exposition chaude est tout à fait défavorable à la fructification du pin d'Alep en milieu semi-aride, mais plutôt favorable en bioclimat subhumide.

La production des cônes et des graines est fortement corrélée à la vigueur des arbres et à la fertilité du site. La vigueur des arbres sur pieds dépend elle-même des conditions climatiques et édaphiques du site. Selon Ayari (2012), il existe une tendance à la hausse de la fructification observée dans les sites d'expositions NE (nord-est), SE (sud-est), S (sud) et NO (nord-ouest), où les valeurs moyennes en rendement de production les plus élevées en cônes et en graines ont été obtenues. L'absence de différences significatives est une conséquence de la grande variabilité observée entre les placettes échantillonnées d'une part, et la dissemblance qui pourrait exister concernant la disponibilité des ressources nutritives et des températures optimales au cours de la pollinisation, qui semble jouer un rôle principal dans la reproduction du pin d'Alep. Toutefois, nous déduisons que les sites situés en exposition NE, SE, S et NO sont les plus favorables pour la reproduction des arbres du pin d'Alep. En effet, ces sites peuvent être caractérisés par des températures optimales, une lumière suffisante et une humidité modérée. Selon Vennetier *et al.* (2010), un meilleur remplissage des cônes en graines a un déterminisme génétique en partie lié aux caractéristiques morphologiques des arbres sur pied et au bioclimat de toute la zone, pas à l'environnement local. Les résultats obtenus, ici, doivent être évalués par de futurs efforts et travaux de plantations à court et à long terme pour mieux apprécier les différences entre les expositions.

3. Effets des caractéristiques du site forestier et de la morphologie de l'arbre

3.1. Effet des caractéristiques du site (ombrage, densité et surface terrière)

Dans la littérature, la densité et la surface terrière (G) ont été les variables les plus influentes sur la fructification. Le rendement de production en cônes et en graines est optimal pour des densités faibles et des surfaces terrières élevées. Autrement dit, la fructification est abondante chez les gros arbres à houppiers disjoints. Selon Ayari (2012), le taux de recouvrement (ombrage) n'a pas d'effet significatif ni sur le nombre de cônes produits par arbre (#C/arbre), ni sur son contenu en graines (#Gr/arbre et PGr/arbre). Les travaux de recherche dans les forêts du pin d'Alep, méditerranéennes, ont montré qu'une densité élevée a un effet négatif et curvilinéaire sur le nombre de cônes (#C/arbre), le nombre de graines (#Gr/arbre) et le poids des graines (PGr/arbre) produites par arbre (Tableau 3). En outre, on a remarqué que la fructification a diminué presque de moitié lorsque la densité des forêts du pin s'élève de 250 arbres/ha à 1000 arbres/ha). L'augmentation de la densité peut donc réduire le rendement en cônes et en graines. Ceci pourrait s'expliquer par la diminution du volume des houppiers, d'où une baisse de la vigueur des arbres et de leurs activités photosynthétiques. Dans ce type de site (densité élevée), les observations directes prouvent que les cônes se concentrent dans la partie sommitale des arbres sur pieds. En sites plus ouverts, les arbres sont moins concurrencés et les cônes peuvent se former sur une plus grande surface incluant tout le périmètre du houppier. La compétition entre arbres sur pieds (inter et intra-spécifique) aboutit à la réduction de la disponibilité des ressources nutritives et en eau pour chaque arbre. D'où la formation de cônes de petites tailles surtout lorsque les ressources nutritives sont limitées. Par conséquent, une réduction de la densité des arbres serait favorable à l'amélioration de la fructification. La surface terrière a montré un effet positif hautement significatif et linéaire sur le nombre de cônes

produits par arbre (#C/arbre) ainsi que sur le nombre et le poids des graines extraites par arbre (#Gr/arbre et PGr/arbre). Selon Ayari (2012), un maximum de production en cônes et en graines a été observé lorsque la surface terrière atteint son optimum (Tableau 3). En conséquence, la densité correspond au nombre de tiges qu'on trouve sur une surface donnée (exprimée en ha) alors que la surface terrière d'un peuplement est la somme des surfaces terrières individuelles sachant que lors de l'inventaire, on mesure pour chaque arbre le diamètre ou la circonférence à 1,30 m. Celle-ci permet alors de déduire que les paramètres morphologiques de l'arbre ont une influence sur sa capacité.

Tableau 3. Effet des caractéristiques du site (densité et surface) sur le nombre de cônes produits par arbre (#C), le nombre et le poids des graines produites (#Gr et PGr) par arbre dans les forêts du pin d'Alep en Tunisie.

Paramètre	Modèle de prédiction	P>Fr
Densité (arbre/ha)	#C/arbre (n) = -184,220 log (densité) + 654,175	r = -0,47***
	#Gr/arbre (n x 10 ³) = -5,565 log (densité) + 46,628	r = -0,42***
	PGr/arbre = -211,670 log (densité) + 760,239	r = -0,45***
Surface terrière (m²/ha)	#C/arbre (n) = 0,065 (Surface terrière) + 35,890	r = 0,41***
	#Gr/arbre (n x 10 ³) = 5,127 (Surface terrière) + 2875	r = 0,41***
	PGr/arbre = 0,089 (Surface terrière) + 32,571	r = 0,47***

***p<0,001.

3.2. Effet de la morphologie de l'arbre

A l'échelle de l'arbre, des effets linéaires hautement significatifs du diamètre du tronc à 1,30m, de la hauteur totale (H₀), de la hauteur et du diamètre du houppier (H_{h0} et D_{h0}), de la surface de projection (S_p) et de l'âge de l'arbre sur le nombre de cônes produits par arbre (#C/arbre) d'une part et sur le nombre de graines et leurs poids respectifs produits par arbre d'autre part ont été enregistrés (#Gr/arbre et PGr/arbre). Le diamètre à la hauteur de poitrine est l'une des variables explicatives les plus importantes de la fructification du pin

d'Alep. Cette variable est très dépendante de la fertilité du site, de la densité et de l'âge du peuplement. L'accroissement en diamètre à 1,30m se traduit alors par une augmentation de la production en cônes et en graines dans les forêts étudiées (Tableau 4).

Tableau 4. Effet des paramètres dendrométriques (diamètre à 1,30m, hauteur totale (H_0), la hauteur et le diamètre du houppier (H_{h0} et D_{h0})) et de l'âge de l'arbre sur le nombre de cônes (#C), le nombre et le poids des graines (#Gr et PGr) produits par arbre dans les forêts du pin d'Alep en Tunisie.

Paramètre	Modèle de prédiction	P>Fr
DHP (cm)	#C/arbre (n) = 30,493 (DHP) - 29,220	r = 0,55***
	#Gr/arbre ($n \times 10^3$) = 1623,347 (DHP) - 2274	r = 0,54***
	PGr/arbre (g) = 29,515 (DHP) - 66,271	r = 0,63***
H₀ (m)	#Gr/arbre ($n \times 10^3$) = 1623,347 (DHP) - 2274	r = 0,54***
	PGr/arbre (g) = 29,515 (DHP) - 66,271	r = 0,63***
	PGr/arbre (g) = 11,455 (H_0) - 15,004	r = 0,60***
H_{h0} (m)	#C/arbre (n) = 31,793 (H_{h0}) - 8,825	r = 0,53***
	#Gr/arbre ($n \times 10^3$) = 2,537 (H_{h0}) - 1,268	r = 0,54***
	PGr/arbre (g) = 46,272 (H_{h0}) - 48,548	r = 0,65***
D_{h0} (m)	#C/arbre (n) = 37,427 (D_{h0}) - 32,018	r = 0,58***
	#Gr/arbre ($n \times 10^3$) = 2,830 (D_{h0}) - 1,975	r = 0,56***
	PGr/arbre (g) = 40,045 (D_{h0}) - 16,775	r = 0,52***
Age (an)	#C/arbre (n) = 1,402 (âge) + 50,266	r = 0,31**
	PGr/arbre (g) = 1,752 (âge) + 16,775	r = 0,33**

p<0,01; *p<0,001.

De même, la hauteur totale est un paramètre important pour caractériser la productivité des espèces forestières. Elle influence positivement le nombre de cônes ainsi que leurs contenus en graines (nombre et poids) par arbre. Donc, toute croissance en hauteur totale (H_0) est accompagnée par un accroissement de production en cônes et en graines chez le pin d'Alep.

En outre, le diamètre du houppier (D_{h0}) se développe d'autant plus que l'arbre dispose plus d'espace. Ces deux variables (diamètre et hauteur du houppier) sont souvent utilisées comme variables de vigueur et ou de compétition entre les sujets au sein des peuplements forestiers. L'accroissement en hauteur et en diamètre du houppier s'est aussi accompagné par une

amélioration de la fructification. Selon Ayari (2012), l'effet de l'âge sur la production de cônes et de graines est en grande partie corrélé avec les autres paramètres susmentionnés (diamètre à 1,30m, H_o , D_{ho} et H_{ho}). Pareillement, l'effet de l'âge est dépendant des caractéristiques du houppier, qui dépend à son tour de la densité et de la fertilité.

En résumé, l'optimum de production est atteint lorsque la hauteur et le diamètre du houppier dépassent 8 m, expliqué par un meilleur taux de lumière disponible aux arbres souvent de grandes cimes, aboutissant à une amélioration de la surface foliaire. Donc, il est fortement recommandé d'intervenir par des éclaircies dans les forêts denses du pin d'Alep pour optimiser la production des cônes et des graines.

4. Dépendance de la dimension du cône et de la production en graines

La taille des cônes est très variable dans le temps et selon le bioclimat sous lequel ils grossissent (2^{ème} année du cycle). Sur le même arbre, la taille du cône peut varier du simple au double puisqu'elle dépend de la vigueur de l'arbre, des conditions du milieu local, du sol et de la topographie. La taille des cônes dépend aussi de la vigueur de la branche qui les porte. En Tunisie, le poids moyen d'une graine (PMIGr) varie entre 8,02 et 23,48 mg, avec une moyenne de 15,65 mg (Ayari, 2012). Par référence à d'autres recherches (Ayari et Khouja, 2014), le PMIGr du pin d'Alep varie entre 12 et 40 mg. La variabilité observée au niveau du PMIGr pourrait être expliquée par l'effet de la taille qui est étroitement liée au rendement en graines produites par cône ($p < 0,05$). De même, le volume moyen du cône (VMC) a montré uniquement un effet significatif sur le poids des graines par cône (PGr/C). Par conséquent, la taille du cône pourrait être utilisée comme un moyen d'estimation approprié du PMIGr, à partir duquel, on en déduit que plus les cônes sont sains et volumineux plus ils contiennent des graines saines et bien pleines (Tableau 5).

Tableau 5. Effet de quelques paramètres du cône (longueur (LoMC), largeur (LaMC) et volume (VMC)) sur son contenu en graines (nombre (#/Gr/C) et poids (PGr/C)) dans les forêts du pin d'Alep en Tunisie.

	LaMC	LoMC	VMC
#Gr/C	0,322***	0,518***	-
PGr/C	0,792***	0,825***	0,488*

*p<0,05; ***<0,001.

5. Modèles de prédiction de la production en graines

La recherche de relations entre le nombre de cônes produits par arbre (#C/arbre) en fonction d'un certain nombre de paramètres explicatifs relatifs aux arbres et au peuplement a abouti au modèle multi-varié suivant où $R^2 = 0,490$ (Tableau 6).

$$\#C/arbre = -82,990 + 18,985 H_o - 1,454 \text{ âge} - 0,366 \text{ Ombrage} + 45,557 D_{ho} \quad \text{Eq (1)}$$

Concernant la production en graines, deux modèles multi-variés ont été retenus pour prédire le rendement des graines extraites des cônes mûres, par arbre. Le premier modèle a tenu compte des effets combinés des caractéristiques de la placette et de l'arbre individuel. Dans ce modèle (Eq 2), les différents paramètres suivants : le subhumide (SH) (variable binaire [0-1]: s'il s'agit du SH on prend la valeur 1 si autres on prend la valeur 0), la surface de projection du houppier (S_p) et la hauteur totale (H_o) sont considérées comme variables explicatives du poids des graines extraites (PGr/arbre) avec $R^2 = 0,529$ ($p < 0,001$).

$$PGr/arbre = -36,683 + 101,640 SH + 4,197 S_p + 16,967 H_o \quad \text{Eq (2)}$$

Le second modèle n'a tenu compte que du poids total des cônes produits par arbre. Le modèle retenu est le suivant (Eq 3), c'est le modèle qui a le coefficient de détermination R^2 le plus élevé ($R^2 = 0,930$).

$$PGr/arbre = 6,652 + 29,948 SH + 56.866 PC/arbre \quad \text{Eq (3)}$$

Tableau 6. Estimation des paramètres des modèles obtenus sous régression multiple pour la prédiction de la production en cônes et en graines dans les forêts du pin d'Alep.

<i>Modèle</i>	<i>Variable</i>	<i>Paramètre estimé</i>	<i>Erreur type</i>	<i>Pr>F</i>
#C/arbre* Modèle 1	<i>Pente</i>	-82,990	27,592	0,0036
	<i>H_o</i>	18,985	4,573	<0,0001
	<i>âge</i>	-1,454	0,531	<0,0077
	<i>Ombrage</i>	-0,366	0,179	0,0444
	<i>D_{ho}</i>	-45,557	9,292	<0,0001
PGr/arbre Modèle 2	<i>Pente</i>	-36,683	29,710	0,2208
	<i>SE1</i>	101,640	29,847	0,0011
	<i>S_p</i>	4,197	1,017	0,0001
	<i>H_o</i>	16,967	5,351	0,0022
PGr/arbre Modèle 3	<i>Pente</i>	6,652	5,224	0,2067
	<i>SE1</i>	29,948	10,746	0,0067
	<i>PC/arbre</i>	56,866	2,902	<0,0001

*#C/arbre: nombre de cônes par arbre, PGr/arbre: poids des graines par arbre, H_o: Hauteur totale, D_{ho} diamètre du houppier, SE1: Subhumide, S_p: Surface de projection.

6. Conclusion

Le présent chapitre s'est intéressé à l'étude des effets individuels ou combinés des facteurs environnementaux sur la production en cônes et en graines dans les forêts du pin d'Alep en Tunisie. En plus de leur caractère fondamental, les informations fournies ont un grand intérêt pratique dans la mesure qu'elles peuvent profiter aux décideurs et plus particulièrement aux développeurs qui s'intéressent aux problèmes techniques de gestion des forêts du pin d'Alep. Parmi les facteurs environnementaux étudiés, la longitude a été définie comme le facteur géographique le plus déterminant dans la fructification de l'espèce. L'effet combiné de l'altitude et de la longitude a aussi affecté notablement la taille des cônes. Pour les facteurs climatiques, ce sont les précipitations cumulées durant le cycle de maturité du cône qui ont eu une influence sur le nombre de cônes produits par arbre ainsi que sur leur contenu en graines. En outre, les versants d'exposition NE, NO, S et SE offrent les meilleures récoltes en graines dans les forêts du pin d'Alep. La taille du cône

peut avoir un effet direct sur la production en graines, autrement, plus les cônes sont sains et volumineux plus ils contiennent des graines saines et pleines. Également, l'accroissement en hauteur et en diamètre du houppier aboutit à une production en cônes et en graines plus abondante. La réduction de la densité des arbres dans les sites, là où le nombre de tiges sur pieds est élevé, contribuerait à l'amélioration de la fructification de l'espèce. Il est donc fortement recommandé d'appliquer un programme d'éclaircie dans les forêts denses afin d'optimiser la production en cônes et en graines.

Remerciements

L'auteur adresse ses plus vifs remerciements à M^r Michel Vennetier, chercheur spécialisé en Ecologie Forestière à l'IRSTEA (Ex-CEMAGREF), pour les efforts déployés et le temps qu'il a consacré pour l'examen de ce chapitre. Qu'il soit remercié pour les interrogations, les commentaires et les suggestions qui ont été apportées et qui ont permis d'améliorer ce manuscrit en fond et en forme.

Références bibliographiques

- Ayari A, Moya D, Rejeb MN, Ben Mansoura A, Albouchi A, De Las Heras J, Fezzani T, Hanchi B. 2011. Geographical variation on cone and seed production of natural *Pinus halepensis* Mill. forests in Tunisia. *J Arid Environ* 75:403–410.
- Ayari A, Zubizarreta GA, Tomé M, Tomé J, Garchi S, Henchi B. 2012. Stand, tree and crown variables affecting cone crop and seed yield of Aleppo pine forests in different bioclimatic regions of Tunisia. *For Syst* 21:128–140.
- Ayari A., Khouja ML. 2014. Ecophysiological variables influencing Aleppo pine seed and cone production: A review. *Tree Physiology*, 34: 426-437.
- Ayari, A. 2012. Influence des différents facteurs environnementaux sur la fructification du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. Thèse de Doctorat en Sciences Biologiques. Faculté des Sciences de Tunis, 230p.
- Boulli A, Baaziz M, M'Hirit O. 2001. Polymorphism of natural populations of *Pinus halepensis* Mill. in Morocco as revealed by morphological characters. *Euphytica* 119:309–316.
- Cain M.D, Shelton M.G. 2004. Revisiting the relationship between common weather variables and loblolly–shortleaf pine seed crops in natural stands. *New Forests* 9, 187-204.
- Nasri N, Khaldi A, Triki S. 2004. Variabilité morphologique des cônes et graines de pin d'Alep et pin pignon en Tunisie. *Rev For Fr* 21–28.
- Shröder K., Labidi A., Mezni F. 2014. Analyse des chaînes de valeur des produits forestiers non ligneux en Tunisie: « Zgougou, lentisque et myrte ». Rapport du projet Adaptation au changement climatique des politiques forestières dans la région MENA.

GFA Consulting Group, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 56p.

Vennetier M, Girard F, Didier C, Ouamim S, Ripert C. 2011. Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique. Forêt méditerranéenne, 2011, 32 (2): 151-167.

Vennetier M, Ripert C, Brochiero F., Rathgeber C., Chandioux O., Esteve R. 2010. Evaluation de la croissance du pin d'Alep en région méditerranéenne française. Revue Forestière Française LXII (5):503-524.

CHAPITRE 7

Les principaux extractibles du pin d'Alep Tunisien : leurs propriétés physico-chimiques, activités biologiques et applications

Lamia Hamrouni¹, Ismail Amri¹, Mariem Khouja¹⁻², Mohsen Hanana³, Samia Gargouri⁴, Mohamed Larbi Khouja¹ et Bassem Jamoussi⁵

¹ Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts. BP. 10. Rue Hédi Karray. Ariana 2080. Université de Carthage, Tunisie

² INSAT- Université de Carthage, Tunisie

³ CBBC – Borj Cedria Université de Carthage, Tunisie

⁴ INRAT Université de Carthage, Tunisie

⁵ Institut supérieur de l'éducation et de la formation (ISEFC)

Résumé. Généralement les substances actives naturelles à partir des extraits d'organes de pin d'Alep (huiles essentielles, huiles végétales extraits naturels bruts) présentent un potentiel réel pour le secteur forestier et qui peuvent profiter aux industriels dans des domaines variés pour le développement de nouveaux produits naturels à grande valeur ajoutée.

Le rendement en huiles essentielles (HE) est très variable. L'organe prélevé à partir de la plante, du site et de l'époque de prélèvement, constituent les principaux facteurs de variation. La composition chimique des HE du pin d'Alep varie nettement selon les organes et selon les sites de récolte. Les hydrocarbures monoterpéniques sont les plus représentés dans les HE obtenues à partir des tiges (80,1%) et des cônes (78,2%), tandis que les monoterpènes oxygénés et les hydrocarbures sesquiterpéniques sont présents à de faibles quantités. D'autre part, les hydrocarbures monoterpéniques (42,8%) et les hydrocarbures sesquiterpéniques (48,3%) forment ensemble la majeure partie des HE des aiguilles. La quantification des polyphénols et des flavonoïdes a mis en évidence un effet provenance très hautement significatif ($p < 0,0001$). De ce fait, les polyphénols présentent une source très intéressante pour l'élaboration des produits d'intérêt économique tels que les produits pharmaceutiques et cosmétiques. L'activité herbicide est significativement influencée par les doses utilisées et le type d'organe végétal à partir duquel est extraite l'huile essentielle. Les HE des aiguilles, des cônes et des tiges ont complètement inhibé la germination et la croissance des semis de toutes les espèces testées et leurs effets inhibiteurs se sont révélés supérieurs à ceux des l'herbicide commercial.

Mots-clés: Pin d'Alep, huiles essentielles, extraits bruts, activités biologiques, polyphénols.

Abstract. The main extractable of Tunisian Aleppo pine: their physico-chemical properties, biological activities and applications. Generally natural active substances from the extracts of Aleppo pine organs (essential oils, plant crude extracts, vegetable oils), have a real potential for the forestry sector and that can benefit industry in various fields for

the development of new natural products with high added value.

The yield of essential oils (HE) is very variable. The nature of the organ, the site of collection and the period are the main factors of variation. The chemical composition of HE Aleppo pine varies considerably according to the organs and collection sites. Monoterpene hydrocarbons are the most represented in HEs obtained from stems (80.09%) and cones (78.22%), while oxygenated monoterpene and sesquiterpene hydrocarbons are present in small amounts. Furthermore, monoterpene hydrocarbons (42.8%) and sesquiterpene hydrocarbons (48.29%) together form the major part of HE needles.

Quantification of polyphenols and flavonoids revealed a very highly significant site effect ($p < 0.0001$). Therefore, the polyphenols present a very interesting source for the development of economic products such as pharmaceuticals and cosmetics. The herbicidal activity is significantly influenced by the doses used and the type of plant organ from which is extracted essential oil. HE needles, cones and stems inhibited completely germination and seedling growth of all tested species and their inhibitory effects were higher than those of commercial herbicide.

Keywords: Aleppo pine, essential oils, crude extracts, biological activities, polyphenols.

1. Introduction

Les plantes médicinales constituent une source inépuisable de substances biologiquement actives et sont à la base de la phytothérapie, une discipline en perpétuelle évolution. (Duraffourd *et al.*, 1997). La recherche continue de substances d'origine végétale telles que les huiles essentielles (HE) ou les huiles végétales offre de nouvelles perspectives pour des usages thérapeutiques très variés. En effet, depuis quelques années, un intérêt de plus en plus croissant est porté sur les huiles essentielles et les huiles fixes (Kempf *et al.*, 2011). Les extractibles ayant montré des propriétés biologiques confirmées trouvent des applications très variées dans de nombreux domaines, notamment pharmaceutique, cosmétique et agro-alimentaire (Kaloustrian *et al.*, 2008). Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), espèce autochtone et commune en Tunisie, présente plusieurs vertus thérapeutiques en plus de sa valeur nutritionnelle bien connue. En médecine traditionnelle, plusieurs organes et extraits tels que les bourgeons, les aiguilles, l'essence ou la résine sont utilisés essentiellement comme expectorant, balsamique, antiseptique et antirhumatismal. L'objectif de ce chapitre est de présenter une synthèse des travaux réalisés en Tunisie sur les

substances actives obtenues à partir d'extraits d'organes de pin d'Alep, (huiles essentielles, huiles végétales extraits naturels bruts), qui présentent un potentiel réel pour le secteur forestier et qui peuvent profiter aux industriels dans des domaines variés pour le développement de nouveaux produits naturels à grande valeur ajoutée.

2. Les extractibles obtenus à partir du pin d'Alep

2.1 Les huiles essentielles

2.1.1. Rendement et propriétés physico-chimiques des huiles essentielles du pin d'Alep

Pour une majorité d'espèces végétales, le rendement en huiles essentielles (HE) est très variable. L'organe prélevé sur la plante, le site de prélèvement, l'époque de prélèvement constituent les principaux facteurs de variation.

En ce qui concerne l'organe végétal et dans le cadre de l'étude menée par Amri (2013), les rendements en huiles essentielles (HE) obtenus à partir des aiguilles, tiges et cônes de pin d'Alep varient faiblement en fonction du type d'organe (tableau 1).

Les rendements les plus élevés proviennent des aiguilles et des cônes (0,85 et 0,8% respectivement), tandis que les tiges affichent le rendement le plus bas (0,6%). Par ailleurs, les faibles indices de réfraction (~ 1,5) et d'acide (1,76-2,40) obtenus pour les HE extraites à partir des différents organes de pin d'Alep autorisent une utilisation cosmétique (Kanko *et al.*, 2004).

Concernant le site de prélèvement, Amri (2013) a trouvé que le rendement en HE varie considérablement en fonction de la provenance du matériel végétal. Le rendement moyen des HE extraites à partir des aiguilles du Pin d'Alep recueillies dans trois localités différentes (Djebel Abderrahmen, Korbous et Sidi Ismail) varie notablement de 0,3 à 0,87 % avec un maximum à Sidi Ismail. Dob *et*

al. (2005) rapportent un rendement de 0,52% dans les aiguilles du Pin d'Alep algérien.

Tableau 1 : Rendements et propriétés physico-chimiques des huiles essentielles extraites des aiguilles, tiges et cônes de pin d'Alep*.

Organe	Rendement (%)	Indice de réfraction	Densité	Indice d'acidité	Couleur
Aiguilles	0.85±0.003 a	1.48±0.0a	0.83±0.0a	1.76±0.020a	Jaune
Cônes	0.8±0.001a	1.47±0.0b	0.89±0.0b	2.40±0.018b	Jaune
Tiges	0.6±0.005b	1.48±0.0a	0.87±0.0b	1.87±0.001a	Transparent

Les moyennes avec la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes selon le test de comparaison des moyennes de Student-Newman-Keuls ($\alpha = 0,05$).

*Le matériel végétal (aiguilles, cônes et tiges) est récolté dans la partie aérienne de 5 arbres de pin d'Alep plantés dans le jardin de l'INRGREF en février 2009.

2.1.2. Composition des huiles essentielles du Pin d'Alep

Pour une même espèce végétale, la composition chimique des HE dépend de plusieurs facteurs et varie fortement en termes du nombre de composés présents dans les huiles et de leurs taux respectifs. L'étude réalisée par Amri (2013) montre que la composition chimique des HE du pin d'Alep varie nettement selon les organes et selon les sites de récolte. Si l'on considère le type de matériel végétal utilisé pour l'extraction, 58 composés ont été identifiés dans les HE extraites à partir des aiguilles avec z-caryophyllène (33,9%) et β -pinène (10,7%) en tant que constituants principaux, 57 composés dans les cônes avec α -pinène (51,7%) et z-caryophyllène (15,1%) en tant que composants principaux et seulement 27 dans les tiges avec l' α -pinène (63%) et le myrcène (14,9%) en tant que composants principaux (Tableau A1 en annexe). Le total des composés identifiés dans les aiguilles, les cônes et les tiges est respectivement de 97,56%, 99,87% et 97,43% de l'ensemble des composés contenus dans les HE. Les hydrocarbures monoterpéniques sont le plus représentés dans les HE obtenues à partir de tiges (80,1%) et des cônes (78,2%), tandis que les monoterpènes oxygénés et les hydrocarbures sesquiterpéniques sont présents à de faibles

quantités. D'autre part, les hydrocarbures monoterpéniques (42,8%) et les hydrocarbures sesquiterpéniques (48,3%) forment ensemble la majeure partie des HE des aiguilles.

Des résultats différents ont été observés dans d'autres pays méditerranéens. Ainsi, les HE extraites des aiguilles du pin d'Alep recueillies en Italie, au Maroc, en Grèce et en Algérie ne représentent que 16,4-26,3%, 14,2%, 19,1% et 2,7-40,3% de *z*-caryophyllène respectivement (Roussis *et al.*, 1995 ; Tazerouti *et al.*, 1993 ; Vidrich *et al.*, 1988 ; Macchioni *et al.*, 2003). En outre, l' α -pinène relativement abondant dans ces huiles, il l'est beaucoup moins dans les huiles tunisiennes. En effet, il atteint 18,1% en Italie, 23,3% au Maroc et 17,6% en Algérie, alors qu'il ne représente que 9,9% en Tunisie. Le contenu de l'humulène dans les HE des aiguilles (7,4%) est proche de celui observé en Algérie (7,9%), tandis qu'il est mineur ou absent en Italie, en Grèce et au Maroc. La différence trouvée entre les différents pays peut être essentiellement attribuée à la variabilité des conditions du milieu (climat et sol) et la diversité du matériel génétique propre à chaque pays.

L'origine géographique peut être aussi un facteur de différenciation entre les sites de récolte et peut induire une variation quantitative et qualitative importante du profil chimique des HE extraites chez la même espèce, à partir d'un même matériel végétal et récolté à la même date. L'étude réalisée par Amri (2013) sur des aiguilles de pin d'Alep prélevées dans 3 lieux de récolte différents à savoir : Sidi Ismail, Korbous et Jbel Abderahmane (tableau A2 en annexe) a mis en évidence une différence au niveau du nombre des composés et de la teneur des composés majeurs. En effet, les HE de la provenance Sidi Ismail se caractérisent par leur richesse en *Z*-caryophyllène (28,9%) alors que celles provenant des autres régions : Korbous et Jbel Abderahmane sont plutôt riches en β -myrcène (respectivement 19,1 et 22,9%). Dans l'ensemble, les huiles des trois provenances sont dominées par la présence des hydrocarbures monoterpéniques (53,2 ; 58,1%) et des hydrocarbures sesquiterpéniques (32,3 ; 41,2%).

En accord avec ces résultats, plusieurs études ont montré l'existence d'une forte variabilité de la production de métabolites secondaires en relation avec le climat et les conditions du sol (Viljoen *et al.*, 2005). Des différences notables concernant les composés majoritaires ont été mentionnées notamment par Panos *et al.* (1995) et Dob *et al.* (2005) en Italie, au Maroc, en Grèce et en Algérie dont les taux en (Z) -caryophyllène sont de l'ordre de (16,4-26,3%), 14,2%, 19,1% et (2,7-40,3%) respectivement. En outre, l' α -pinène qui est abondant dans les huiles tunisiennes, on le retrouve à des taux variables dans les autres huiles : 18,1% en Italie, 23,3% au Maroc et 17,6% en Algérie (Panos *et al.*, 1995 ; Dob *et al.*, 2005).

Pareillement, une autre étude a été réalisée par Khouja (2016) sur le rendement et les qualités physico chimiques des HE extraites à partir des aiguilles du pin d'Alep. Elle a concerné 4 provenances tunisiennes de pin d'Alep : Selloum, M'Guila, Takrouna et Ousselatia d'âge égal (42 ans) plantées dans le site expérimental de Korbous, dans les mêmes conditions pédoclimatiques. Le rendement moyen en HE chez les quatre provenances étudiées est de 1,09 % et varie significativement en fonction de la provenance de 0,95% (Takrouna) à 1,67% (Selloum). L'analyse de la composition de l'huile essentielle a révélé une forte variabilité en termes de présence-absence des composés et des taux des composés présents. En effet, on remarque une dominance nette de β -caryophyllène dans les différents échantillons avec un taux moyen de 49,5 % (toute provenance confondue) qui varie de 37,5 à 59,8% selon les provenances. De par cette dominance, les provenances peuvent être à juste titre considérées des chémotypes à β -caryophyllène. Cependant, en plus du β -caryophyllène, les HE obtenues se caractérisent par la présence d'autres composés avec des taux relativement élevés à savoir : l' α - humulène, le cembrène, l' α -pinène et à degré moindre le β -pinène. Ces composés retrouvés d'une manière spécifique chez les provenances du pin d'Alep sont soit totalement absents soit présents à des taux beaucoup plus faibles dans les HE du pin maritime (Khouja, 2016).

La quantification des polyphénols et des flavonoïdes a mis en évidence un effet provenance très hautement significatif ($p < 0,0001$) et montre que c'est la

provenance Takrouna qui se démarque par sa richesse en polyphénols (196,6 mg GAE/g MS) et en flavonoïdes (18,1 mg ER/g MS). De ce fait, elle se présente comme une source non négligeable de composés phénoliques et peut être utilisée dans l'élaboration des produits d'intérêt économique tels que les produits pharmaceutiques et cosmétiques.

2.1 Huile végétale

2.2.1. Propriétés physico-chimiques de l'huile végétale des graines de pin d'Alep

Les graines des pins et plus particulièrement du pin d'Alep et du pin maritime sont riches en huile végétale ou huile fixe. Nous rapportons, ci après, les résultats des principaux travaux réalisés en Tunisie.

L'étude réalisée par Amri (2013) a porté sur les graines de pin d'Alep collectées dans quatre sites différents localisés à Thibar, Kasserine, El Kef et Tabarka en comparaison avec celles du pin maritime issu des régions de Kasserine et de Tabarka. L'extraction des huiles fixes est faite en présence d'un solvant : l'hexane. La caractérisation physico-chimique des huiles extraites a concerné la teneur en carotène, en polyphénols totaux et l'extinction spécifique.

2.2.1.1. Teneur en carotène

L'analyse comparative des deux espèces de pin (pin d'Alep et pin maritime) révèle des différences inter et intra spécifiques significatives du point de vue teneur en β -carotène (figure 1).

Ainsi, la teneur la plus élevée est observée chez le pin d'Alep (14,8ppm) et dépasse de loin celle du pin maritime (4,7 ppm). Sachant que le β -carotène constitue environ 15-55% des caroténoïdes totaux, le β -carotène a pour rôle de filtrer les longueurs d'onde actives des radiations lumineuses en protégeant ainsi l'huile contre l'activation de l'oxygène par la lumière. Kiritsakis et Osman (2005)

ont montré que l'effet du β -carotène diminue progressivement au cours de l'exposition de l'huile à la lumière. Les pigments caroténoïdes sont facilement dégradés en présence de la lumière et des températures élevées.

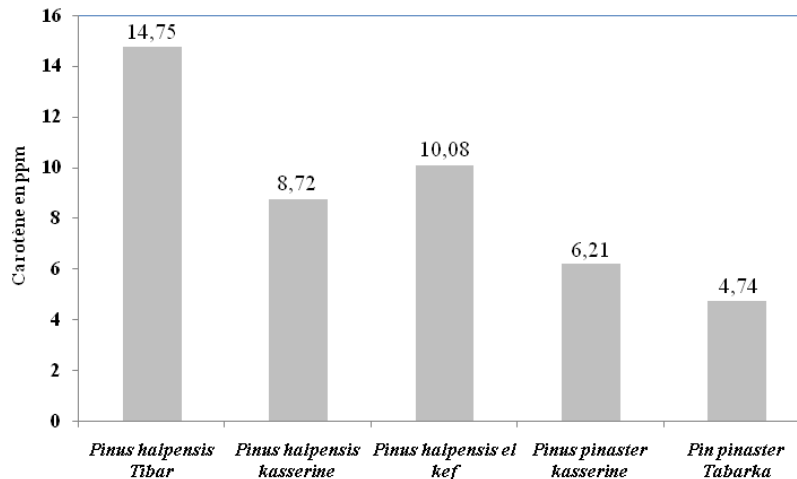


Figure 1: Variation de la teneur en β -carotène chez les huiles végétales extraites des graines de deux pins : pin d'Alep et pin maritime

2.2.1.2. Teneur en polyphénols totaux

Les teneurs des huiles des deux pins étudiés en polyphénols totaux varient de 8,9 mg équivalent d'acide gallique (EAG) pour le pin maritime à 17,09 mg EAG pour le pin d'Alep (Figure2). Sachant que les polyphénols jouent un rôle essentiel dans la qualité, la couleur et la durabilité naturelle de la graine, et que l'évaluation du contenu en composés phénoliques dans la graine peut-être un indicateur de changements d'état dû aux différentes conditions environnementales ou une réponse à des traitements particuliers des graines. Le contenu en composés phénoliques est aussi fortement influencé par la génétique à l'échelle spécifique. L'étude réalisée nous a permis de confirmer que l'huile végétale extraite des graines du pin d'Alep est plus riche en polyphénols en comparaison avec celle du pin maritime. De même, une variation de la teneur en polyphénols est enregistrée en fonction de la localisation géographique des sites

de récolte du pin d'Alep. En effet, l'huile végétale de la région de Thibar est plus riche en polyphénols que celle de Kasserine et du Kef. Il est évident que les teneurs relativement élevées en polyphénols des huiles du pin d'Alep leur confèrent une stabilité plus importante que celle du pin maritime sachant que l'activité phénolique se situe entre 20 et 60 mg d'équivalents d'acide gallique.

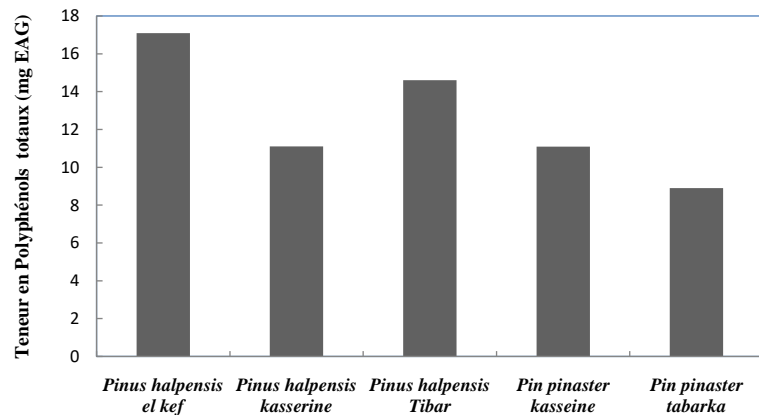


Figure 2 : Variation de la teneur en polyphénols totaux chez les différentes huiles végétales extraites des graines de deux pins : pin d'Alep et pin maritime.

2.2.1.3. L'extinction spécifique

L'extinction spécifique des huiles végétales constitue un paramètre important de leur qualité. Elle permet de fournir des indications sur la qualité de la matière grasse, sur son état de conservation et sur les modifications dues aux processus technologiques. Plus particulièrement, l'extinction spécifique à 232 nm peut être considérée comme un indicateur de «fraîcheur» de l'huile. En effet, plus le degré d'extinction à λ :232 nm est élevé, plus l'huile est peroxydée (présence des produits d'oxydation des acides gras = hydroperoxydes linoléiques, acides gras oxydés). De même, plus l'extinction à λ :270nm est forte, plus l'huile est riche en produits d'oxydation secondaires (aldéhydes, alcools, cétones,...) et se traduit par une faible aptitude à la conservation. Ainsi, les résultats obtenus (Figure 3) ont montré pour un λ de 232 nm que le pin maritime

présente des valeurs plus élevées (2,46 et 1,62) que celles du pin d'Alep (1,11 ; 0,76 ; 1,03) (Figure 3). A 270 nm, l'extinction spécifique des huiles des deux espèces accuse une réduction, elle est plus remarquable chez les deux provenances du pin maritime.

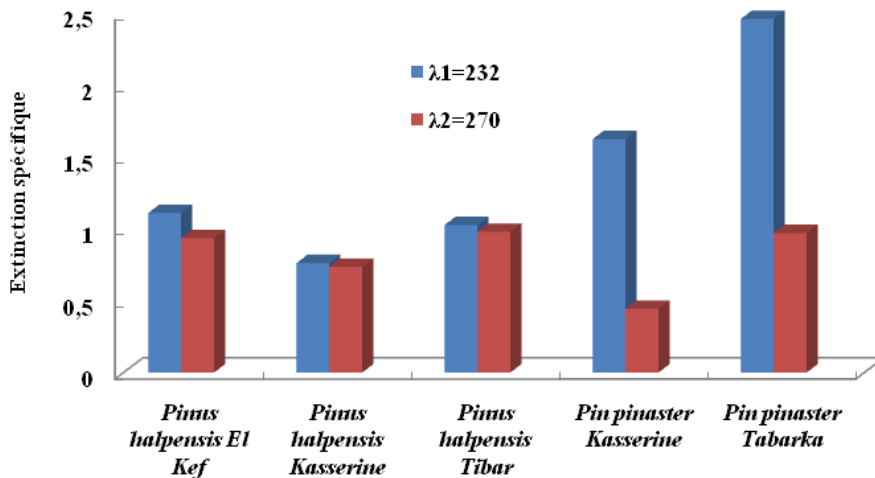


Figure 3 : L'extinction spécifique des huiles végétales extraites des graines de deux pins : pin d'Alep et pin maritime.

2.2.2. Composition en acides gras des huiles végétales du pin d'Alep

Les résultats de l'analyse qualitative et quantitative des huiles végétales extraites des graines des deux pins : pin d'Alep et pin maritime sont mentionnés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Composition en acides gras (%) des huiles végétales extraites des graines de deux pins : pin d'Alep et pin maritime.

Acides gras	Formule	pin d'Alep			pin maritime	
		Thibar	Kef	Kasserine	Tabarka	Kasserine
Acide myristique	C14 :0	0.25	0,05	0	1.12	0,06
Acide palmitique	C16 :0	3.17	4,23	6.43	5.31	4,07
Ac.palmitoléique	C16 :1	0	0,55	1.2	1.4	0,49
Acide stéarique	C18 :0	1.4	0,93	1.92	2.3	0,94
Acide oléique	C18 :1	22.63	23,04	27.92	23.92	20,71
Acide linoléique	C18 :2	56.11	56,65	49.3	56.39	61,54
Acide linoléique	C18 :3	4.37	0,78	5.1	2.12	0,93
Acide gadoléique	C20 :1	0.31	1	0.7	1.9	0,35
Acide béhénique	C22 :0	0.9	0	1.6	6.3	3,29
Acide cétoléique	C22 :1	0	0	0.3	0.17	0,59

Indépendamment de l'espèce, la composition en acides gras est caractérisée par l'abondance des acides gras insaturés. La majeure contribution dans la fraction est attribuée aux acides linoléique (49,3 - 61,5) et oléique (20,7 - 27,9). Les autres acides gras insaturés en particulier les acides palmitoléique (C16 :1), gadoléique (C20 :1) et cétoléique (C22 :1) semblent avoir une contribution moindre dans la composition totale. L'abondance de l'acide linoléique dans les huiles végétales des graines de pin semble avoir un rôle biologique. En effet, il est admis que les graines des espèces oléagineuses accumulent des teneurs relativement élevées en acide linoléique. De par son rôle structural en tant que constituant majeur des membranes cellulaires des différents organites, ce composé est nécessaire pour la germination et la croissance des jeunes plantules et constitue une source énergétique potentielle durant les premiers stades du développement de la plante (Somerville *et al.*, 2000). Il est intéressant de signaler aussi que certaines différences qualitatives et quantitatives sont observées dans l'huile des espèces de même provenance sachant ainsi que les acides gras de la plante sont sensibles à la lumière et à la température. De telles différences révèlent vraisemblablement des différences du fond génétique ou environnemental.

Par ailleurs, le travail réalisé par Khouja (2016) sur 4 provenances tunisiennes de pin d'Alep (Ousselatia, M'Guila, Selloum et Takrouna) montre une

grande richesse en acides gras insaturés dans l'huile végétale extraite à partir des graines de ces 4 provenances qui se chiffre à 26,5% d'acide oléique et 40,5% d'acide linoléique. La provenance Ousselatia s'est distinguée par le taux le plus élevé en acide linoléique (40,9%) et la provenance M'Guila par le taux le plus élevé en acide oléique (29,1%). La provenance Selloum s'est plutôt distinguée par sa richesse relative en acide palmitique (15,2%) et en acide stéarique (22,7%).

3. Les Activités biologiques

3.1. Activité herbicide des huiles essentielles du pin d'Alep

L'activité phytotoxique des HE de différents organes du pin d'Alep a été évaluée sur la base de leurs effets sur la germination et la croissance de 3 plantes adventices à savoir : *Sinapis arvensis*, *Lolium rigidum* et *Raphanus raphanistrum*, qui concurrencent les cultures céréalières et réduisent leur production en graines. L'effet herbicide des HE a été comparé avec un produit commercial, à base d'ester d'isooctyle 2,4-D. Les résultats obtenus montrent que l'activité herbicide est significativement influencée par les doses utilisées et le type d'organe végétal à partir duquel est extraite l'huile essentielle. Les HE des aiguilles, des cônes et des tiges ont complètement inhibé la germination et la croissance des semis de toutes les espèces testées (tableau A 3 en annexe) et leurs effets inhibiteurs se sont révélés supérieurs à ceux de l'herbicide commercial. Globalement, ce sont les HE des tiges qui ont l'effet inhibiteur le plus puissant à une concentration de 1µl/ml.

À concentration égale, les HE extraites des aiguilles ont affecté notablement la germination de *S. arvensis* et *R. raphanistrum*, contrairement au *Lolium rigidum* qui a montré une plus grande résistance. En revanche, les HE des cônes ont considérablement réduit la croissance juvénile des plants. À la concentration de 2 µl/ml, les HE des aiguilles et des cônes ont complètement inhibé la germination et la croissance des plantes adventices testées.

On peut conclure que les HE de cônes et de tiges possèdent un meilleur effet herbicide par comparaison à celles des aiguilles. De même, les HE des tiges et des cônes ont une composition chimique comparable où l' α -pinène constitue le composé principal. Par conséquent, l'effet allélopathique des HE semble fortement lié à la composition chimique des HE. En effet, les HE des tiges ont une teneur élevée en composés oxygénés par rapport aux aiguilles et aux cônes, elles ont eu de ce fait un effet phytotoxique plus important et plus sélectif contre la germination et la croissance des plantes. Selon d'autres auteurs (Scrivanti *et al.*, 2003 ; López, *et al.*, 2009), les HE riches en composés oxygénés sont plus actives que celles riches en composés hydrocarbonés.

D'après Dudai *et al.* (2004), ce sont les composés monoterpéniques qui sont responsables de l'inhibition de la germination. Les monoterpènes peuvent provoquer des changements anatomiques et physiologiques chez les semis conduisant à l'accumulation de globules lipidiques dans le cytoplasme ou la réduction de certains organites tels que les mitochondries (Koitabashi *et al.* 1997 ; Zunino *et al.*, 2004 ; Nishida *et al.* ; 2005).

Dans notre cas, l'effet inhibiteur des HE des tiges sur la germination et la croissance des plantes peut être attribué à la richesse de ces huiles en α -pinène ce qui corrobore les résultats d'Abraham *et al.* (2003) qui ont montré que l' α -pinène affecte le métabolisme énergétique des mitochondries isolées des coléoptiles de maïs et des racines primaires. De Feo *et al.* (2002) ont pu montrer aussi que l' α -pinène a inhibé la germination et la longueur racinaire de *Raphanus sativus*. Cependant, d'autres composants majeurs et/ou mineurs dans les HE des cônes, des tiges ou des aiguilles (Tableau 1) peuvent donner lieu à des effets herbicides plus ou moins importants, de ce fait, l'existence d'interactions synergiques entre ces composants n'est pas à exclure.

Par ailleurs, il a été vérifié que l'activité herbicide diffère significativement avec l'origine géographique des échantillons récoltés (Tableau A4 en annexe). Ce sont les HE de la provenance Korbous qui présente un effet inhibiteur le plus puissant sur la germination et sur la croissance des semis chez les trois espèces testées.

3.2. Activité antifongique des huiles essentielles du pin d'Alep

L'activité antifongique des HE des aiguilles, des cônes et des tiges de pin d'Alep a été testée contre 7 souches phytopathogènes à savoir : *Fusarium avenaceum*, *Fusarium culmorum*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium subglutinans*, *Fusarium verticillioides*, *Fusarium nygamai*, *Rhizoctonia sp*, *Microdochium nivale*, *Alternaria sp*. Les résultats obtenus ont montré que les HE réduisent significativement la croissance de tous les champignons testés (Tableau A5 en annexe). Les HE des différents organes présentent des effets d'inhibition comparables sur la prolifération des champignons. En général, il y a une relation entre l'activité antifongique et le taux de certains composants majeurs. La présence des composés majeurs communs et la faible proportion des monoterpènes oxygénés dans les HE extraites à partir des trois organes (aiguilles, cônes et tiges) pourraient expliquer la similitude de leurs propriétés antifongiques.

L'activité antifongique des HE dépend étroitement du site de prélèvement du matériel végétal (Tableau A6 en annexe). Si l'on considère les HE des aiguilles du pin d'Alep, Jbel Abderahmane possède un effet inhibiteur plus élevé par rapport aux deux autres provenances, un tel résultat peut être expliqué par la richesse des HE des aiguilles en hydrocarbures et en monoterpènes oxygénés et par sa faible concentration en sesquiterpènes. La croissance des espèces fongiques en présence des HE a montré différents degrés d'inhibition. En effet, les souches *F. oxysporum*, *Bipolaris*, *Microdochium* et *Alternaria* ont montré une plus grande résistance à l'action des HE de la région de Sidi Ismail par comparaison aux deux autres provenances. Les huiles de Sidi Ismail se sont distinguées par une teneur plus élevée en sesquiterpènes par rapport aux deux autres provenances. L'analyse de la composition chimique des HE extraites des trois régions, montre que ces huiles sont riches en α et β -pinènes, myrcène, terpinéol et d'autres monoterpènes qui sont présents avec des quantités appréciables. Sachant que les sesquiterpènes en particulier le Z-caryophyllène possède une activité antifongique plus significative que le limonène et le β -

myrcène (Chang *et al.*, 2008), mais dans notre étude, l'effet fongicide faible a été obtenu avec l'échantillon de Sidi Ismail qui possède le taux le plus élevé en Z-caryophyllène. D'autres travaux de recherche s'accordent bien avec nos résultats et montrent que l'activité antifongique est due à l'action des monoterpènes oxygénés ou hydrocarbonés (Chutia *et al.*, 2009 ; Matasyoh *et al.*, 2007). Par conséquent, il est évident que les HE et ses substances apparentées agissent pour rendre la membrane cellulaire du champignon perméable, provoquant ainsi des fuites du contenu cellulaire (Piper *et al.*, 2001). De même, les composés chimiques comme α -pinène, ont une activité antifongique et antibactérienne (Matasyoh *et al.*, 2007) qui se trouvent dans des quantités appréciables dans l'huile du pin d'Alep.

3.3. Activité antioxydante des huiles essentielles des feuilles et de l'extrait méthanolique des graines du pin d'Alep

Khouja (2016), travaillant sur l'activité antioxydante du pin d'Alep et du pin maritime, approchée par les tests DPPH et β -carotène, a pu montrer l'existence d'une forte variabilité intraspécifique chez le pin d'Alep pour chacun des deux types d'extrait utilisés (extrait méthanolique obtenu à partir des graines et HE obtenus à partir des feuilles). Aussi, quel que soit le test effectué, elle a pu déceler une activité antioxydante plus élevée chez le pin d'Alep, comparée à celle du pin maritime. La comparaison entre les deux types d'extrait montre globalement que l'activité antioxydante de l'extrait méthanolique est meilleure que celle des HE.

3.4. Activité d'inhibition d'acétylcholinestérase des huiles essentielles et de l'extrait méthanolique du pin d'Alep

Pour l'activité d'inhibition d'acétylcholinestérase, les résultats montrent l'existence d'une différence hautement significative ($p < 0,0001$) entre les provenances de pin d'Alep quel que soit le type d'extrait avec une activité

d'inhibition d'acétylcholinestérase des HE beaucoup plus élevée que celle de l'extrait méthanolique Khouja (2016). L'activité d'inhibition d'acétylcholinestérase des huiles essentielles pourrait être expliquée par leur richesse en monoterpènes (Orhan *et al.*, 2008 ; Aazza *et al.*, 2011).

Références bibliographiques

- Aazza, S., Lyoussi, B., Miguel, M. G., 2011. Antioxidant and antiacetylcholinesterase activities of some commercial essential oils and their major compounds. *Molecules* 16, 7672-7690.
- Amri I., Hamrouni L., Hanana M., Gargouri S., Fezani T., Jamoussi B. 2013. Chemical composition, physico-chemical properties, antifungal and herbicidal activities of *Pinus halepensis* Miller essential oils. *Biological Agriculture and Horticulture*. Vol.29.
- Bonzani I.C., George J.H. and Stevens M.M. 2009. Novel materials for bone and cartilage regeneration. *Curr.opin. chem.Biol.* 10(6) : 45-51.
- Chang C., Yang M., Wen H., Chern J. 2008. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *J. Food Drug Anal.*, 10, pp. 178-182
- Chutia M., Deka Bhuyan P., Pathak M.G., Sarma T.C., Boruah P. 2009. Antifungal activity and chemical composition of Citrus reticulate Blanco essential oil against phytopathogens from North East India. *Food Science and Technology*. 42, pp. 777-780
- De Feo V. 1992. Medicinal and magical plants on northern Peruvian Andes. *Fitoterapia*, 63:417-440.
- Dob T., Darhmane D., Benabdelkader T. & Chelghoum T.C., 2006. Studies on the essential oils and antimicrobial activity of *Thymus algeriensis* Boiss. & Reut. *Int. J. Aromatherapy*, 16(2), 95-100.
- Duraffourd C., Lapraz J-C., Chemli R. 1997. La plante médicinale de la tradition à la science. 1er congrès Intercontinental. Tunis. Ed. Granche. Paris, 222.
- Kaloustrian J., Chevalier J., Mikail C., Martino M., Abou L. et Vergnes M-F., 2008. Etude de six huiles essentielles: composition chimique et activité antibactérienne, *Phytothérapie*, Vol. 06,160-164.
- Kanko C, Bamba EL-Hadj S, Kone S, Koukoua G, N'guessan YT. 2004. Study of physico-chemical properties of essential oils of *Lippia multiflora*, *Cymbopogon citratus*, *Cymbopogon nardus*, *Cymbopogon giganteus*. *C. R. Chim.* 7:1039-1042.
- Kempf F., McCoy K.D., De MeeûsWahlund T. 2011. Effects and sex-biased dispersal in *Ixodes ricinus*, the European vector of Lyme borreliosis: new tools for old data *Infect. Genet. Evol.*, 10, pp. 989-997.
- Kiritsakis A, Osman M. 2005. Effets du bêta-carotène et de l'alphatocophérol sur la stabilité photo-oxydative de l'huile d'olive. *Oliva* ; 56.

- Koitaishi, R., Suzuki, T., Kawazu, T., Sakai, A., Kuroiwa, H. and Kuroiwa, T. 1997. 1,8-Cineole inhibits roots growth and DNA synthesis in the root apical meristem of *Brassica campestris* L., *J. Plant. Res.*, 110, 1-6.
- Lopez M.L., Peralta-Videa J.R., Parason J.G., Gardea-Terroses J.L. 2008. Concentration and biotransformation of arsenic by *Prosopis* sp. Grown in soil treated with chelating agents and phytohormones. *Environ.Chem.* 5 : 320-331.
- López, M. L., N. E. Bonzani & J. A. Zygodlo. 2009. Allelopathic potential of *Tagetes minuta* terpenes by a chemical, anatomical, and phytotoxic approach. *Biochem. Syst. Ecol.* 36: 882–890.
- Macchioni F., Cioni P.L., Flamini G. ; Morelli I., Maccioni S. and Ansaldi M. 2013. Chemical composition of essential oils from needles; branches and cones of *Pinus pinea*, *P. halepensis*, *P. pinaster* and *P. nigra* from central Italy. *Flavour and Fragrance Journal* 18 : 139-143.

ANNEXES

Tableau A1 : Composition chimique des huiles essentielles extraites à partir des aiguilles, cônes et tiges du pin d'Alep.

N°	RI ^a	RI ^b	Composés	Jardin INRGREF			S.Ismail	J.abderrahmen	Korbous
				Aiguilles	Cônes	Tiges	Aiguilles		
1	926	1015	Tricyclene	tr	0.29	-	-	0.11	-
2	931	1020	α -thujene	0.56	0.24	0.17	0.62	1.37	0.25
3	939	1026	α -pinene	9.9	51.70	63.00	12.59	11.7	13.14
4	953	1052	camphene	tr	-	-	tr	-	-
5	958	1121	thuja-2.4(10)-dien	tr	0.75	-	0.1	0.12	0.13
6	976	1125	sabinene	1.10	0.20	0.52	6.52	2.46	2.4
7	980	1129	β -pinene	10.70	1.38	0.52	11.8	5.77	3.13
8	988	1152	myrcene	9.52	10.33	14.90	8.5	19.09	22.9
9	991	1156	3-octanone	tr	tr	-	tr	-	tr
10	1005	1160	α -phellandrene	0.44	11.88	-	tr	tr	tr
11	1011	1148	δ -3-carene	0.77	tr	0.20	0.83	1.16	0.78
12	1018	1187	α -terpinene	0.18	0.15	-	0.37	0.34	0.82
13	1026	1258	p-cymene	1.20	0.50	-	tr	tr	0.1
14	1031	1218	limonene	1.87	tr	0.56	1.25	1.43	1.95
15	1041	1221	phenyl	1.16	-	-	1.65	0.65	2.25
16	1050	1251	E- β -ocimene	-	tr	-	tr	-	-
17	1062	1236	δ -terpinene	0.34	tr	-	0.67	0.58	1.4
18	1068	1560	Zsabinene hydrat	tr	0.51	-	tr	tr	0.19
19	1088	1287	α -terpinolene	5.36	-	0.22	8.11	11.01	8.6
20	1094	1311	α -pinene oxide	tr	tr	-	tr	0.21	tr
21	1115	1450	β -thujone	tr	-	-	tr	0.17	tr
22	1121	1644	Z-p-menth-2-en-1	-	0.30	-	tr	-	tr
23	1125	1508	α -campholenal	tr	0.48	0.07	tr	0.16	tr
24	1140	1650	trans-p-menth-2-	-	0.34	-	tr	0.52	0.27
25	1143	1473	camphor	tr	tr	0.40	tr	tr	0.125
26	1161	1412	pinocarvone	-	tr	0.07	-	0.21	tr
27	1168	1646	umbellone	0.04	tr	0.07	tr	tr	tr
28	1177	1571	α -terpin-4-ol	0.18	0.16	-	0.66	0.92	2.25
29	1189	1673	α -terpeneol	0.11	0.31	0.14	1.45	1.13	1.32
30	1196	1668	Z-piperetol	tr	-	0.12	tr	tr	tr
31	1203	1733	Verbenone	tr	0.70	-	tr	tr	tr
32	1213		Iso-dihydrocarved	tr	tr	0.07	tr	-	-
33	1219	1564	Z-sabinene	tr	tr	-	tr	tr	tr
34	1229	1764	Citronellol	tr	tr	-	tr	tr	tr
35	1235	1597	Thymol methyl	tr	tr	-	0.3	0.1	tr
36	1244	1586	Carvacrol methyl	tr	tr	-	tr	0.1	tr
37	1252	1812	Piperetone	tr	tr	-	tr	tr	tr
38	1279	1562	Iso bornyl acetate	0.21	0.03	-	tr	0.74	0.17
39	1305		Carvacrol	0.02	0.09	-	tr	-	tr
40	1332		δ -elemene	-	0.06	-	0.1	0.1	0.01
41	1349	1677	α -terpenyl acetate	0.05	0.20	-	0.1	1.5	0.1
42	1363	1520	β -bourbounene	0.38	-	0.19	0.5	0.17	0.25
43	1376	1515	α -copaene	0.09	tr	-	0.1	0.25	0.13
44	1383	1566	β -cubebene	tr	tr	-	-	tr	-
45	1397	1573	langifolene	tr	-	-	0.02	1.11	tr
46	1418	1608	Z-caryophyllene	33.90	15.05	4.90	28.9	16.16	18.1
47	1439		Allo	tr	-	-	-	-	-
48	1444	1834	Z-muurrola-4-	0.10	tr	-	0.25	tr	0.1
49	1454	1670	α -humulene	7.40	0.41	0.80	5.2	2.85	2.85
50	1459		Trans- β -farnasen	tr	0.16	tr	-	-	-
51	1495	1755	Bicyclo	5.20	tr	tr	5.2	12.37	10.16
52	1490		Cis-eudesma-	0.55	0.22	0.45	0.8	0.21	0.45
53	1501		Epi zonarene	tr	-	-	tr	-	tr
54	1509	1929	Cubebol	0.33	tr	-	0.16	0.75	0.2
55	1511	1741	β -bisabolene	0.26	0.16	-	0.48	0.17	0.6

Les principaux extractibles du pin d'Alep Tunisien : leurs propriétés physico-chimiques, activités biologiques et applications. Hamrouni L. *et al.*, p146-167.

Tableau A1 (suite) : Composition chimique des huiles essentielles extraites à partir des aiguilles, cônes et tiges du pin d'Alep.

N°	RI ^a	RI ^b	Composés	Jardin INRGREF			S.Ismail	J.abderrahmen	Korbous
				Aiguilles	Cônes	Tiges	Aiguilles		
56	1523	1524	δ-cadinene	0.27	0.12	-	0.21	0.72	0.27
57	1536	1735	itaclene ether	1.16	tr	-	0.19	tr	0.27
58	1546	1913	β-calacorene	-	0.13	-	0.175	-	0.17
59	1559	2215	Z muurola-5-en-4-	tr	tr	-	0.1	0.145	0.1
60	1581	2008	caryophyllene	1.05	0.86	5.20	0.8	-	1.2
61	1596	2093	cedrol	-	0.58	3.60	tr	0.34	tr
62	1606	2002	humulene oxide II	0.16	0.20	tr	0.1	-	0.22
63	1630	2163	α-acorenol	tr	tr	-	tr	0.28	0.1
64	1634	2212	β-acorenol	tr	0.21	tr	0.1	0.17	0.4
65	1654	2170	α-cadinol	2.60	0.15	0.14	0.23	0.77	0.6
66	2054	2530	abetateriene	-	0.43	0.67	tr	-	-
Total identifié:				99.93	98.54	99.2			
Hydrocarbures monoterpéniques:				53.17	55.92	58.14			
Monoterpènes oxygénés:				2.91	4.41	4.45			
Hydrocarbures de Sesquiterpène:				41.21	34.79	32.25			
Sesquiterpènes oxygénés:				2.63	3.41	4.16			

RI : Indice de Réention, tr : trace (<0.1%), - : non-déecté, ^a : Colonne Apolaire HP-5 MS, ^b : Colonne Polar HP Innowax.

Tableau A2 : Composition chimique de l'huile essentielle des aiguilles du Pin d'Alep issue de 3 provenances différentes (Sidi Ismail, J. Abderrahmen, Korbous).

N°	Composé	R.I.	RI ^b	Sidi Ismail	J. Abderrahmen	Korbous
1	Tricyclene	926	1015	-	0.11	-
2	α-thujene	931	1020	0.62	1.37	0.25
3	α-pinene	939	1026	12.59	11.7	13.14
4	camphene	953	1052	tr	-	-
5	thuja-2,4(10)-diene	958	1121	0.1	0.12	0.13
6	sabinene	976	1125	6.52	2.46	2.4
7	β-pinene	980	1129	11.8	5.77	3.13
8	β-myrcene	988	1152	8.5	19.09	22.9
9	3-octanone	991	1156	tr	-	tr
10	α-phellandrene	1005	1160	tr	tr	tr
11	δ-3-carene	1011	1148	0.83	1.16	0.78
12	α-terpinene	1018	1187	0.37	0.34	0.82
13	p-cymene	1026	1258	tr	0tr	0.1
14	limonene	1031	1218	1.25	1.43	1.95
15	phenyl acetaldehyde	1041	1221	1.65	0.65	2.25
16	(E)-β-ocimene	1050	1251	tr	-	-
17	δ-terpinene	1062	1236	0.67	0.58	1.4
18	(Z)-sabinene hydrate	1068	1560	tr	tr	0.19
19	α-terpinolene	1088	1287	8.11	11.01	8.6
20	α-pinene oxide	1094	1311	tr	0.21	tr
21	β-thujone	1115	1450	tr	0.17	tr
22	(Z)-p-menth-2-en-1-ol	1121	1644	tr	-	tr
23	α-campholenal	1125	1508	tr	0.16	tr
24	(Z)-p-menth-2-en-1-ol	1140	1650	tr	0.52	0.27
25	camphor	1143	1473	tr	tr	0.125
26	pinocarvone	1161	1412	-	0.21	tr
27	umbellolol	1168	1646	tr	tr	tr
28	α-terpinen-4-ol	1177	1571	0.66	0.92	2.25
29	α-terpeneol	1189	1673	1.45	1.13	1.32
30	(Z)-piperetol	1196	1668	tr	tr	tr

Les principaux extractibles du pin d'Alep Tunisien : leurs propriétés physico-chimiques, activités biologiques et applications. Hamrouni L. *et al.*, p146-167.

Tableau A2 (suite) : Composition chimique de l'huile essentielle des aiguilles du Pin d'Alep issue de 3 provenances différentes (Sidi Ismail, J. Abderrahmen, Korbous).

N°	Composé	R.I.	RI ^b	Sidi Ismail	J. Abderrahmen	Korbous
31	verbenone	1203	1733	-tr	tr	tr
32	<i>iso</i> -dihydrocarveol	1213		tr	-	-
33	(<i>E</i>)-sabinene hydrate acetate	1219	1564	tr	tr	tr
34	citronellol	1229	1764	tr	tr	tr
35	thymol methyl ether	1235	1597	0.3	0.1	tr
36	carvacrol methyl ether	1244	1586	tr	0.1	tr
37	piperetine	1252	1812	tr	tr	tr
38	isobornyl acetate	1279	1562	tr	0.74	0.17
39	carvacrol	1305		tr	-	tr
40	δ -elemene	1332		0.1	0.1	0.01
41	α -terpenyl acetate	1349	1677	0.1	1.5	0.1
42	β -bourbounene	1363	1520	0.5	0.17	0.25
43	α -copaene	1376	1515	0.1	0.25	0.13
44	β -cububene	1383	1566	-	tr	-
45	langifolene	1397	1573	0.02	1.11	tr
46	(<i>Z</i>)-caryophyllene	1418	1608	28.9	16.16	18.1
47	(<i>Z</i>)-muurrola -4-(14),5-diene	1444		0.25	tr	0.1
48	α -humulene	1454	1834	5.2	2.85	2.85
49	(<i>Z</i>)- β -farnasene	1459	1670	-	-	-
50	Bicyclogernacrene	1495		5.2	12.37	10.16
51	(<i>E</i>)-eudesma-6,1,1-diene	1490	1755	0.8	0.21	0.45
52	<i>epi</i> -zonarene	1501		tr	-	tr
53	cubebol	1509	1929	0.16	0.75	0.2
54	β -bisabolene	1511	1741	0.48	0.17	0.6
55	δ -cadinene	1523	1524	0.21	0.72	0.27
56	itacilene ether	1536	1735	0.19	tr	0.27
57	β -calacorene	1546	1913	0.175		0.17
58	(<i>Z</i>)-muurolo-5-en-4-ol	1559	2215	0.1	0.145	0.1
59	caryophyllene oxide	1581	2008	0.8	-	1.2
60	cedrol	1596	2093	tr	0.34	tr
61	humulene peroxide II	1606	2002	0.1	-	0.22
62	α -acorenol	1630	2163	tr	0.28	0.1
63	β -acorenol	1634	2212	0.1	0.17	0.4
64	α -cadinol	1654	2170	0.23	0.77	0.6
65	abietateriene	2054	2530	tr	-	-
Total identifié:				99.93	98.54	99.2
Hydrocarbures monoterpéniques:				53.17	55.92	58.14
Monoterpènes oxygénés:				2.91	4.41	4.45
Hydrocarbures de Sesquiterpène:				41.21	34.79	32.25
Sesquiterpènes oxygénés:				2.63	3.41	4.16

RI : Indice de Réention, MS : Spectrométrie de masse, Co-GLC : Co-injection, tr : trace (<0.1%), - : non-déecté, ^a: Colonne Apolaire HP-5 MS, ^b: Colonne Polar HP Innowax.

Les principaux extractibles du pin d'Alep Tunisien : leurs propriétés physico-chimiques, activités biologiques et applications. Hamrouni L. *et al.*, p146-167.

Tableau A3 : Effet des huiles essentielles extraites des différents organes du pin d'Alep (aiguilles, tige et cônes) sur la germination et la croissance des parties aériennes et racinaires de trois plantes adventices (*Sinapis arvensis*, *Raphanus raphanistrum* et *Lolium rigidum*) utilisant 3 concentrations d'huile (0.5, 1 et 2 µl/ml) par comparaison au témoin.

Plantes adventices	Organe	Traitements	Dose (µl/ml)	Germination (%)	Croissance végétative (mm)	
					Partie racinaire	Partie aérienne
<i>Sinapis arvensis</i>	Aiguilles	Contrôle	0	100.0±0.0 d	43.3±0.0 f	36.0±1.0 e
		HE	0.5	40.0±4.0 c	31.3±2.3 d	28.3±0.3 d
			1	14.0±1.0 b	27.3±0.3 c	21.6±0.3 c
			2	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a
		2.4 D	2	12.0±3.0 b	22.6±0.3 b	19.3±2.3 b
<i>Raphanus raphanistrum</i>		Contrôle	0	92.0±3.0 e	33.3±0.3 e	25.6±0.3 c
		HE	0.5	68.0±1.0 d	23.3±0.3 d	24.3±1.3 c
			1	46.0±1.0 c	15.6±1.3 c	17.0±1.0 b
			2	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a
		2.4 D	2	6.0±1.0 b	14.0±2.3 b	11.3±2.3 b
<i>Lolium rigidum</i>	Contrôle	0	66.0±4.0 c	35.6±1.3 d	33.6±0.3 c	
	HE	0.5	66.0±1.0 c	32.0±1.0 c	31.0±1.0 b	
		1	64.0±1.0 c	28.6±0.3 b	30.6±1.3 b	
		2	56.0±1.0 b	27.6±0.3 b	29.6±0.3 b	
	2.4 D	2	10.0±3.0 a	15.6±0.3 a	21.3±0.3 a	
<i>Sinapis arvensis</i>	Tige	Contrôle	0	100.0±0.0 e	43.3±0.3 e	36.0±1.0 d
		HE	0.5	38.0±1.0 d	37.6±0.3 d	28.3±0.3 d
			1	22.0±0.0 c	29.6±0.3 c	13.3±0.3 b
			2	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a
		2.4 D	2	12.0±3.0 b	22.6±0.3 b	19.3±2.3 b
<i>Raphanus raphanistrum</i>		Contrôle	0	92.0±3.0 e	33.3±0.3 e	25.6±0.3 e
		HE	0.5	28.0±4.0 d	26.3±0.3 d	20.6±0.3 d
			1	10.0±1.0 c	19.3±2.3 c	14.3±0.3 c
			2	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a
		2.4 D	2	6.0±1.0 b	14.0±2.3 b	11.3±2.3 b
<i>Lolium rigidum</i>	Contrôle	0	66.0±4.0 e	35.6±1.33 e	33.6±1.3 d	
	HE	0.5	28.0±1.0 d	22.3±2.3 d	24.3±2.3 c	
		1	16.0±1.0 c	18.0±1.0 c	22.0±1.0 b	
		2	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	
	2.4 D	2	10.0±3.0 b	15.66±0.33 b	21.3±0.3 b	
<i>Sinapis arvensis</i>	Cônes	Contrôle	0	100.0±0.0 e	43.3±0.3 e	36.0±1.0 d
		HE	0.5	38.0±1.0 d	37.6±0.3 d	28.3±0.3 d
			1	22.0±0.0 c	29.6±0.3 c	13.3±0.3 b
			2	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a
		2.4 D	2	12.0±3.0 b	22.6±0.3 b	19.3±2.3 b
<i>Raphanus raphanistrum</i>		Contrôle	0	92.0±3.0 e	33.3±0.3 e	25.6±0.3 e
		HE	0.5	28.0±4.0 d	26.3±0.3 d	20.6±0.3 d
			1	10.0±1.0 c	19.3±2.3 c	14.3±0.3 c
			2	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a
		2.4 D	2	6.0±1.0 b	14.0±2.3 b	11.3±2.3 b
<i>Lolium rigidum</i>	Contrôle	0	66.0±4.0 e	35.6±1.33 e	33.6±1.3 d	
	HE	0.5	28.0±1.0 d	22.3±2.3 d	24.3±2.3 c	
		1	16.0±1.0 c	18.0±1.0 c	22.0±1.0 b	
		2	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	0.0±0.0 a	
	2.4 D	2	10.0±3.0 b	15.66±0.33 b	21.3±0.3 b	

Les moyennes avec la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes selon le test de Student-Newman-Keuls ($\alpha = 0,05$).

Les principaux extractibles du pin d'Alep Tunisien : leurs propriétés physico-chimiques, activités biologiques et applications. Hamrouni L. *et al.*, p146-167.

Tableau A4 : Effet herbicide des huiles essentielles du pin d'Alep de 3 provenances différentes (Sidi Ismail, J. Abderrahmen, Korbus) et 4 concentrations (0, 0.5, 1 et 2 µl/ml) sur la germination et la croissance des plants (en mm) de 3 espèces adventices (*Sinapis arvensis*, *Raphanus raphanistrum* et *Lolium rigidum*).

Plante adventice	Trait.	Dose (µL/mL)	Sidi Ismail		Jbel Abderahmane		Korbus	
			Germination %	Croissance des plants	Germination %	Croissance des plants	Germination %	Croissance des plants
S. arvensis	HE	0	100±0.0a	9.9±0.0a	100±0.0a	9.9±0.0a	100±0.0a	9.9±0.0a
		0.5	73.3±1.6b	5.9±0.2b	76.6±3.3b	3.5±0.1b	516±1.6 b	2.6±0.1b
		1	38.3±1.0c	2.1±0.4c	36.6±1.6c	1.5±0.2c	333±1.6 c	0.9±0.0c
		2	5.0±3.5e	0.1±0.1d	5.0±2.8d	0.4±0.2d	1.6±1.6 e	.03±.03d
	2.4D	2	20.0±10.0d	0.65±0.9 d	20.0±10.0e	0.6±0.9d	20.0±10.0 d	0.6±0.9c
P. canariensis	HE	0	83.3±0.0a	3.5±1.6a	83.3±0.0a	3.5±1.6a	83.3±0.0a	3.5±1.6a
		0.5	43.3±1.7b	1.3±0.1b	50±2.9b	1.5±.13b	30±2.88b	1.1±0.0b
		1	28.3±1.7c	.82±0.1c	15±2.9c	0.4±0.3c	10±2.88c	0.7±0.1c
		2	8.7±3.1e	0.4±0.8d	0.0±0.0d	0.0±0.0d	0±0.0c	0.0±0.0d
	2.4D	2	17.5±2.5d	0.36±0.3d	17.5±2.5c	0.36±0.3cd	17.5±2.5c	0.3±0.3d
T. campestre	HE	0	86.6±1.6a	3.4±0.2a	86.6±1.6a	3.4±0.2a	86.6±1.6a	3.4±0.2a
		0.5	46.6±1.6b	10.1±0.0b	50.0±2.8b	1.2±0.1b	40.0±2.8b	0.6±0.1b
		1	33.3±4.4c	0.9±.1bc	30.0±2.8c	1.1±0.2b	25.0±1.6c	0.2±.3bc
		2	10.0±3.5d	0.4±.1cd	3.3±3. d	0.3±0.0c	0.0±0.0e	0.0±0.0c
	2.4D	2	17.5±2.5d	0.2±0.2d	17.5±2.5d	0.2±0.2c	17.5±2.5d	0.2±.2bc

Les moyennes avec la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes selon le test de Student-Newman-Keuls ($\alpha = 0,05$). Trait : traitement.

Tableau A5 : Activité antifongique (Pourcentage d'inhibition de la croissance) des huiles essentielles extraites des aiguilles du pin d'Alep.

Champignon	Org.	Dose (µl/ml)					
		1µl/ml	2µl/ml	4µl/ml	6µl/ml	8µl/ml	10µl/ml
<i>F. avenaceum</i>	Feuil.	12.7±0.3d	18.8±.2g	23.4±0.2c	36.5±0.3e	39.3±0.0f	42±.3bc
<i>F. culmorum</i>		16.±1.7ef	26.5±0.9i	27.6±0.3f	30.1±0.0b	36.0±0.0c	42.1±.0c
<i>F. oxysporum</i>		5.7±0.3a	12.4±.5d	23.3±0.1c	28.7±0.4a	37.9±0.0d	39±0.3a
<i>F. subglutinans</i>		9.0±1.0b	11.2±.0b	29.8±0.6g	31.7±0.3c	36.7±0.3c	43.3±.3d
<i>F. verticillioides</i>		11.6±.3cd	16.1±.7e	28.1±0.0f	30.9±.2bc	32.2±1.1a	43±.3cd
<i>F. nygamai</i>		15.0±1.0e	17.3±.1f	28.3±0.3f	31.2±.8bc	36.5±0.6c	43.3±.1d
<i>Rhizoctonia sp</i>		6.8±0.5a	9.1±0.0a	19.3±0.1a	28.8±0.4a	33.5±0.3b	41.2±.1b
<i>M nivale</i>		13.2±0.5d	17.6±.1f	22.2±0.0b	33.0±0.0d	43.3±0.3g	45.8±.1e
<i>Alternaria sp</i>		16.8±0.2f	22±1.3h	24.5±0.3d	31.±1.0bc	39.9±0.1e	55.7±.3f
<i>B. sorokiniana</i>		11.0±0.3c	14.5±.3e	26.7±0.4e	33.0±.3d	38.3±.2de	42±.1cd
<i>F. avenaceum</i>	Tige	8.0±0.1ab	14.7±.6c	20.0±1.0bc	23.7±0.3a	32.3±0.1a	39.5±.3a
<i>F. culmorum</i>		12.3±0.6d	17.7±.1e	21.1±1.0cd	27.9±0.8d	31.8±0.5a	41.2±.4b
<i>F. oxysporum</i>		13.3±0.2d	18.8±.4f	25.5±0.3e	31.0±1.0e	39.1±1.0b	42.6±.0b
<i>F. subglutinans</i>		10.0±0.3c	16±1.3d	22.2±1.1d	29.9±0.5e	33.5±1.8a	41.5±.8b
<i>F. verticillioides</i>		9.3±0.8bc	13.3±.3b	19.5±.2abc	24.3±.3ab	33.0±3.0a	40.0±.0a
<i>F. nygamai</i>		8.7±.1abc	11.5±.1a	18.3±0.2a	27±1.7cd	31.3±0.3a	39.7±.6a
<i>Rhizoctonia sp</i>		7.7±0.3a	12.4±.1ac	19.0±0.1ab	25.7±0.6bc	33.7±0.0a	45.0±1.0c
<i>M nivale</i>		8.7±.6abc	13.5±0.8b	20.5±0.1bc	29.8±0.4e	34.7±0.6a	42.3±0.3b
<i>Alternaria sp</i>		15.3±0.3e	22.2±0.1h	29.0±0.8f	35.4±0.4g	40.5±0.3b	51.3±0.1d
<i>B. sorokiniana</i>		13.4±0.2d	20.0±0.0g	28.8±0. 6f	33.0±2.1f	38.1±0.0b	39.0±0.8a

Tableau A5 (suite) : Activité antifongique (Pourcentage d'inhibition de la croissance) des huiles essentielles extraites des aiguilles du pin d'Alep.

<i>F. avenaceum</i>	Cône	9.9 ±0.3c	14.8±0.2c	20.1±0.0d	25.5±0.3d	32.9±0.1b	39.0±0.3b
<i>F. culmorum</i>		13.3 ±.5d	17.6±0.1e	19.6±0.2cd	28.1±0.0e	37.7±2.3c	39.1±0.0b
<i>F. oxysporum</i>		13.3 ±.3d	14.6±0.6c	19.0±0.3c	23.8±0.1b	30.0±1.0a	33.3±0.3a
<i>F. subglutinans</i>		14.7±0.5e	18.8±0.2f	22.5±0.3e	29.0±0.0f	31.2±0.1a	39.1±0.2b
<i>F. verticillioides</i>		9.8±0.4c	12.8±0.4b	24.6±0.3f	32.5±0.0h	38.9±0.1cd	44.4±0.0e
<i>F. nygamai</i>		13.3±0.8d	19.8±0.1f	28.8±0.1h	31.2±0.0g	39.8±0.1d	43.2±0.1d
<i>Rhizoctonia sp</i>		9.8±0.2c	16.7±0.3d	18.9±0.0c	23.7±0.4b	30.0±0.9a	39.9±0.0c
<i>M. nivale</i>		12.3±0.1d	19.8±0.6f	25.7±0.3g	34.3±0.3i	46.8±0.3e	51.2±0.2g
<i>Alternaria sp</i>		7.9±0.1b	13.5±0.0b	17.5±0.3b	24.6±0.0c	30.9±0.0a	43.2±0.0d
<i>B. sorokiniana</i>		3.9±0.0a	9.8±0.1a	13.5±0.1a	20.9±0.1a	31.3±0.2a	45.7±0.3f

Les moyennes avec la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différents selon le test Student-Newman-Keuls ($\alpha = 0,05$). Org. : Organe ; Feuil. : Feuille.

Tableau A6 : Activité antifongique des huiles essentielles des aiguilles de pin d'Alep récoltées dans 3 sites différents (Sidi Ismail, Jbel Abderrahmane et Korbous) sur 10 souches fongiques.

Souche fongique	Témoin	Sidi Ismail		Jbel Abderrahmane		Korbous	
	Crois. ^a (mm)	Crois. (mm)	Inhibition %	Crois. (mm)	Inhibition %	Crois. (mm)	Inhibition %
<i>F. avenaceum</i>	8.1±0.1	4.7±0.1	41.9a	3.9±0.1	51.8a	4.0±0.1	50.6a
<i>F. culmorum</i>	7.5±0.2	5.0±0.2	33.3a	4.9±0.1	34.6a	4.1±0.0	45.3a
<i>F. oxysporum</i>	7.7±0.2	4.7±0.1	38.9b	4.0±0.2	48.0a	4.1±0.0	46.7a
<i>F. subglutinans</i>	7.0±0.1	3.3±0.3	52.8a	3.2±0.1	54.2a	3.3±0.0	52.8a
<i>F. verticillioides</i>	8.1±0.0	4.7±0.1	41.9a	4.7±0.3	41.9a	4.7±0.0	41.9a
<i>F. nygamai</i>	7.6±0.0	3.5±0.1	53.9a	3.7±0.2	51.3a	3.6±0.0	52.6a
<i>Rhizoctonia sp</i>	7.0±0.1	3.6±0.1	48.5a	3.2±0.3	54.3a	4.1±0.0	41.1a
<i>Microdochium nivale</i>	8.0±0.3	4.6±0.1	42.5b	3.7±0.1	53.7a	3.9±0.1	51.1a
<i>Alternaria sp</i>	6.2±0.1	3.4±0.1	45.1b	3.1±0.0	50.0a	3.4±0.0	45.2b
<i>Bipolaris sorokiniana</i>	6.1±0.1	3.5±0.1	42.6b	3±0.0	50.8a	3.0±0.1	50.8a

Les moyennes avec la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes selon le test de Student-Newman-Keuls ($\alpha = 0,05$). ^aCrois. : croissance des espèces fongiques en mm est la valeur moyenne de trois répétitions ± l'écart type (SE).

CHAPITRE 8

Techniques de régénération du pin d'Alep en Tunisie

**Wahbi Jaouadi^{1 et 2}, Naceur Boussaidi¹, Kaouther Mechergui^{1 et 2}, Ali Aloui³,
Messaoud Meliane³, Abdelhamid Khaldi²
et Mohamed Larbi Khouja²**

¹*Institut Sylvo-Pastoral de Tabarka. 8110 Tabarka. Tunisie*

²*Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts. BP. 10. Rue Hédi Karray. Ariana
2080. Tunisie*

³*Expert international en Aménagement et Sylviculture des Forêts
Université de Carthage
Université Manar, Tunisie*

Résumé. La régénération naturelle du pin d'Alep en Tunisie est difficile et très insuffisante, entraînant plusieurs forêts dans un processus de dégradation. De par son absence et son irrégularité, elle a toujours posé de sérieux problèmes, surtout au niveau des peuplements très âgés. Or, la majorité des programmes d'aménagement et de conservation de cette ressource compte principalement sur la régénération naturelle comme moyen de renouvellement. Différents travaux ont été réalisés sur la régénération du pin d'Alep depuis les années soixante. Les coupes d'ensemencement réalisées sur des peuplements denses ont permis d'obtenir une régénération de semis naturels relativement suffisante de 2611 à 2739 semis/ha, à une densité supérieure à 500 arbres semenciers/ha et de 12197 à 15095 semis/ha, à une densité comprise entre 414 et 478 arbres semenciers/ha. Les écartements les plus convenables pour le reboisement du pin d'Alep sont 1,5 m X 5 m, correspondant à une densité de plantation de 1300 plants/ha. Le peuplement s'éclaircit au fur et à mesure pour arriver en fin de compte à un écartement moyen de 5 à 6 m pour un âge de 40 ans. Devant l'absence de régénération spontanée, plusieurs approches et techniques pouvant aller de la régénération assistée jusqu'à la régénération artificielle par plantation sont proposées pour aider et améliorer la régénération du pin d'Alep. La méthode la plus pratique et la plus réussie consiste en un labour de toute la surface à régénérer avant de procéder au semis à la volée à raison de 10 kg/ha en décembre, janvier ou février, suivi d'un recouvrement immédiat des graines par un travail léger du sol, soit au moyen d'une herse légère, soit en tirant de lourds branchages sur la surface semée. La régénération par plantation en poquets ou le semis direct après travail mécanique du sol ont pu donner des résultats satisfaisants. Le labour profond avec la charrue défonceuse a un meilleur effet sur la croissance du pin d'Alep par comparaison au ripage. Dans le domaine de la production des plants en pépinière, les résultats montrent qu'on peut atteindre les normes de croissance et de qualité des plants en utilisant des substrats à base de matériaux locaux et sans recourir aux produits d'importation. Les études faites sur la régénération du pin d'Alep après les incendies montrent que les peuplements naturels se reconstituent rapidement et retrouvent leur composition floristique dès les premières années qui suivent l'incendie.

Mots clés : pin d'Alep, *Pinus halepensis*, régénération naturelle, régénération artificielle, régénération après incendie, densité.

Abstract: Techniques of regeneration of Aleppo pine in Tunisia. The natural regeneration of the Aleppo pine in Tunisia is difficult and very insufficient, causing several forests in a process of degradation. Because of its absence and irregularity, it has always posed serious problems, especially in very old stands. However, the majority of development and conservation programs for this resource rely primarily on natural regeneration as a means of renewal. Various works have been carried out on the regeneration of Aleppo pine since the 1960. Seeding cuts in dense stands resulted in a relatively sufficient regeneration of natural seedlings from 2611 to 2739 seedlings/ha, at a density greater than 500 seed trees/ha and from 12197 to 15095 seedlings/ha, at density between 414 and 478 seed trees/ha. The most suitable spacings for reforestation of Aleppo pine are 1.5 m x 5 m, corresponding to a planting density of 1300 plants/ha. The stand gradually clears to reach an average distance of 5 to 6 m at 40 years old. In the absence of spontaneous regeneration, several forms and techniques ranging from assisted regeneration to artificial regeneration by planting are adopted to help and improve the regeneration of Aleppo pine. The most practical and successful method for the Aleppo pine consists of plowing the entire surface to be regenerated before sowing on the fly at a rate of 10 kg/ha in december, january or february, followed by immediate recovery of the seeds by light work of the soil, either by means of a light harrow or by pulling heavy branches on the sown surface. Regeneration by planting in seedlings or direct seeding after mechanical work of the soil, could give satisfactory results. Deep plowing with the ripper plow has a more beneficial effect on the growth of Aleppo pine compared to shifting. In the field of nursery production, the results show that plant growth and quality standards can be achieved by using substrates based on local materials and without the use of imported products. Studies on the regeneration of Aleppo pine after fires show that natural stands recover quickly and recover their floristic composition in the first years after the fire.

Keywords: Aleppo pine, *Pinus halepensis*, natural regeneration, artificial regeneration, fire regeneration, density.

1. Introduction

En Tunisie, les forêts de pin d'Alep (*Pinus halepensis*) jouent un rôle fondamental sur les plans environnemental, économique et social. La régénération naturelle du pin d'Alep est très irrégulière et a toujours posé de sérieux problèmes au forestier, surtout quand il s'agit de vieux peuplements. L'insuffisance notoire de la régénération a constitué, pour les gestionnaires, un problème préoccupant et a dû inciter la réalisation d'études spécifiques dans

différents pays du pourtour méditerranéen. Afin de favoriser la régénération, diverses méthodes spécifiques aux conifères sont appliquées à travers le monde. Ces techniques interviennent à différents niveaux : au niveau de la préparation du terrain, par des coupes spécifiques au sein du peuplement semencier, par le maintien des branches et des cônes sur le sol après exploitation, par un apport extérieur de graines, voire même par un feu contrôlé. A une échelle expérimentale, seule la régénération par plantation en poquets et le semis direct après un travail mécanisé du sol, ont pu donner des résultats probants parmi une multitude de techniques testées chez le pin d'Alep (Chakroun, 1986). Aussi, afin d'assurer une meilleure survie et espérer une production optimale chez cette espèce, l'utilisation d'un matériel génétique confirmé, le mieux adapté au milieu et le plus performant, s'avère un gage de garantie pour la réussite de nouvelles plantations (Khouja, 1997 ; Khouja et Sgahier, 2000 ; Khouja *et al.*, 2000). La régénération du pin d'Alep en Tunisie est jugée très faible, entraînant les forêts dans un processus de dégradation inquiétante. Les résultats des actions de reboisement effectuées n'ont pas reflété l'effort déployé, en termes du taux de réussite, ou de croissance et de productivité au niveau des plantations réalisées. Diverses causes sont à l'origine de ce résultat, parmi lesquelles la qualité des plants utilisés a constitué l'un des facteurs limitant leur installation et leur survie sur le site de plantation (Burdett, 1983 ; Zine El Abidine, 1993). Des études d'évaluation des anciens périmètres de reboisement ont permis de constater que la mauvaise qualité des plants forestiers utilisés dans les reboisements est l'une des principales causes des échecs enregistrés dans les plantations forestières durant les décennies écoulées (MEAT, 1998 et 1999). A la mauvaise qualité des plants, deux autres facteurs se sont ajoutés pour expliquer les échecs enregistrés, à savoir : la mise en terre des plants dans leurs sachets, ainsi que les techniques de préparation du sol (trous, éléments de gradins, banquettes), notamment les premières années de l'indépendance. Ce constat montre bien le rôle majeur que peut jouer la pépinière et la technique de plantation dans le devenir des plantations. La production des plants constitue, en effet, un maillon principal dans la chaîne des opérations d'un reboisement, dont la réussite en

dépend étroitement. Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des informations scientifiques disponibles sur la régénération et la production des plants du pin d'Alep en Tunisie.

2. Régénération naturelle du pin d'Alep

D'après Nsibi (1997), la régénération naturelle du pin d'Alep dans la forêt de Sakiet est relativement satisfaisante pour un recouvrement compris entre 25 et 75 % (une densité de semenciers de 269 à 357 arbres adultes/ha). Cependant, elle se réduit considérablement pour un taux de recouvrement supérieur à 75 % (une densité de semenciers supérieure à 500 arbres adultes/ha) et elle est absente quand le taux de recouvrement est inférieur à 25 % (une densité de semenciers inférieure à 200 tiges adultes/ha). A l'insuffisance de semenciers, s'ajoute l'action des rongeurs et des oiseaux qui accentuent la perte des graines et réduit de la sorte le stock de semences dans le sol. Nsibi (1979) a conclu que le nombre de semis est hautement corrélé mais négativement au nombre de semenciers ($r = - 0,975$). Cette relation négative indique donc un nombre de semis faible pour une densité de semenciers contrairement élevée. Pour qu'une forêt de pin d'Alep se régénère normalement, il est nécessaire que les semenciers soient régulièrement espacés et épargnés des influences de l'Homme et de ses animaux. Dans une étude sur la régénération naturelle du pin d'Alep en Tunisie centrale (Oum Jedour), Langley (1976) montre que les disséminations naturelles de graines dans les peuplements de pin d'Alep se révèlent faibles. Dans ce sens, l'épandage sur place des branches avec leurs cônes lors d'une coupe d'éclaircie ou des coupes rases, augmentent la quantité des graines dispersées. Aussi, un travail du sol associé à des densités du couvert légères, permet un bon établissement des semis et leur survie. D'après Acherar *et al.* (1984), la colonisation par le pin d'Alep est limitée à une distance restreinte par rapport à l'arbre semencier à cause de la faible distance de dispersion et de dissémination des graines : seulement 3 % des graines tombent à plus de 24 m du semencier. Les graines

réussissent à germer rapidement et en masse, pendant la saison pluvieuse. Cependant, malgré la forte mortalité des jeunes semis, notamment au cours des deux premières années, la perte en régénération se trouve bien compensée grâce à la grande production de semences et à leur taux de germination élevé (Acherar *et al.*, 1984). Si les jeunes semis sont capables de s'installer sur la plupart des types de sol, un recouvrement important par des herbacées leur est très défavorable (Acherar *et al.*, 1984). Quezel et Medail (2003) rapportent que la régénération dans une pinède à pin d'Alep, même dense, ne pose aucun problème tant que l'éclaircissement reste suffisant. Selon Bedel (1986), la régénération du pin d'Alep ne pose pas de problèmes particuliers et peut s'installer sur des sols même très dégradés. Des facteurs tels que le pacage, le broutage par des animaux ou les incendies répétés sont susceptibles d'entraver la survie des jeunes plantules et de rendre la régénération naturelle très faible ou même nulle. Cependant, ces contraintes peuvent être corrigées par des traitements sylvicoles adéquats et un contrôle effectif du pacage. Ainsi, pour obtenir une régénération naturelle suffisante, il est nécessaire de réaliser des coupes rases soit par parquets ou mieux par trouées, en prenant le soin de laisser quelques portes-graines vigoureux et pas trop âgés. Ces semenciers choisis parmi les arbres productifs doivent être répartis uniformément sur l'assiette de la coupe et préservés pendant une durée de 3 à 5 ans jusqu'à l'obtention d'une régénération totale. Une densité de 50 pins par hectare peut être considérée comme un seuil minimum (D'hanens, 1998). En relief accidenté, il est recommandé d'adopter des coupes par bandes larges de 1 à 2 fois la hauteur des arbres. Dans le cas où le sous-bois du pin d'Alep devient envahissant, un recépage devient nécessaire. Une fois la régénération obtenue, il faut intervenir à partir de la 5^{ème} année par des dépressages, en éliminant les tiges mal venantes et sans avenir. Cette opération a pour but de mieux répartir les semis dans l'espace donc optimiser l'espace vital de chaque individu, diminuer l'effet de la concurrence entre eux et permettre naturellement un développement normal des sujets d'avenir. L'installation de la régénération peut être facilitée par le travail du sol (Neveux *et al.*, 1986). La régénération est

pratiquée par des coupes rases localisées dans les peuplements arrivés à maturité par groupes de petites surfaces qui s'agrandissent au fur et à mesure en fonction de l'évolution du semis, suivi d'une mise en défens pour une durée de 10 à 20 ans, selon les zones et le rythme de croissance des plants. La mise en défens stricte est une condition essentielle pour la réussite des jeunes semis du pin d'Alep. Le non-respect de la mise en défens demeure l'un des principaux obstacles de la régénération des forêts du pin d'Alep Nsibi (1997). Selon El Hamrouni et Sarson (1975), le facteur limitant la régénération naturelle du pin d'Alep n'est pas la densité des arbres semenciers, mais plutôt le taux de recouvrement du sous-bois. Ainsi, une diminution du recouvrement entraîne une diminution du nombre de jeunes pins et rend la régénération difficile. Les peuplements de densité moyenne forment, par leurs couronnes, un écran plus ou moins continu, qui crée un microclimat favorable à la germination des graines et au développement des semis (Nsibi, 1997). Selon le même auteur (Nsibi, 1997), les coupes d'ensemencement réalisées dans des peuplements denses ont permis d'obtenir une densité de semis naturels relativement suffisante de 2611 à 2739 semis/ha (densité supérieure à 500 arbres semenciers/ha) et de 12197 à 15095 semis/ha (densité comprise entre 414 et 478 arbres semenciers/ha) (Tableau 1).

Tableau 1: Effet des traitements sylvicoles (coupes d'ensemencement) sur la régénération du pin d'Alep (densité de semis) entre 1990 et 1994 à Sakiet Sidi Youssef (Nsibi, 1997)

Classes de peuplements denses (d > 500 arbres adultes/ha)										
Série	Parc.	1990				% de tiges enlevées	1994			
		Densité de semenciers et de semis avant intervention					Densité de semenciers et de semis après intervention			
		Densité de semenciers		Densité de semis			Densité de semenciers		Densité de semis	
		Pl.	Ha	Pl.	Ha		Pl.	Ha	Pl.	Ha
Takrouna	47	23	732	04	127	43	13	414	80	2548
Touiref	16	21	669	08	255	33	14	446	86	2739
Sakiet II	2	18	573	13	415	16	15	478	78	2484
Sakiet I	17	19	605	06	191	33	12	399	82	2611
Classes de peuplements de densité comprise entre 414 et 478 arbres adultes/ha										
Takrouna	48	15	478	88	2802	47	8	255	474	15095
Touiref	13	14	449	83	2643	36	9	287	427	13599

Tableau 1(suite) : Effet des traitements sylvicoles (coupes d'ensemencement) sur la régénération du pin d'Alep (densité de semis) entre 1990 et 1994 à Sakiet Sidi Youssef (Nsibi, 1997)

Classes de peuplements denses (d > 500 arbres adultes/ha)										
Sakiet I	10	15	478	78	2484	40	9	287	443	14108
Sakiet II	10	13	414	81	2580	38	8	256	383	12197
Etages bioclimatiques sub humide et semi-aride										
Takrouna	46	23	732	2	64	61	9	287	427	13600
Sakiet II	10	13	416	72	2293	39	8	255	383	12207
Ouergha I	51	03	95	2	64	33	2	64	3	95

Parc. : Parcelle ; Pl. : Placette ; Ha : Hectare.

La densité optimale de semenciers dans les étages bioclimatiques sub humide et semi-aride, donnant une régénération naturelle suffisante se situe entre 255 à 287 tiges/ha (Tableau 1).

3. Régénération artificielle

Devant l'absence de régénération spontanée, plusieurs formes et techniques pouvant aller de la régénération assistée jusqu'à la régénération artificielle par plantation sont adoptées pour aider et améliorer la régénération du pin d'Alep.

3.1. Régénération assistée

En vue d'assister et améliorer la régénération du pin d'Alep, Hadri et Tschinkel (1975) ont comparé différentes techniques de préparation du sol et différents modes de régénération par semis direct et par abandon sur place des branchages après coupe rase dans la forêt du pin d'Alep à Oum Jedour (région de Kasserine-Tunisie centrale). Les résultats qu'ils ont obtenus montrent qu'après la coupe rase, aucune technique de préparation du sol et de semis direct n'a amélioré la régénération naturelle. Cependant, ils reportent qu'un abandon du branchage sur place après la coupe rase a permis d'avoir un résultat satisfaisant pour la régénération du pin d'Alep (en moyenne 11 000 plants/ha, 4 ans après la coupe).

Concernant le semis direct, la méthode la plus pratique et la plus réussie pour le pin d'Alep, d'après Hadri et Tschinkel (1976), consiste en un labour de toute la surface à régénérer avant de procéder au semis à la volée à raison de 10 kg/ha en décembre, janvier ou février, suivi d'un recouvrement immédiat des graines par un travail léger du sol, soit au moyen d'une herse légère, soit en tirant de lourds branchages sur la surface semée.

Selon Snane *et al.* (1992), le labour est plus favorable à l'installation et à la réussite des plants du pin d'Alep que le ripage, puisqu'il permet d'accélérer la vitesse de croissance des plants durant les 20 premiers mois qui suivent la plantation. Néanmoins, sur les sols à encroûtement calcaire superficiel, les résultats s'inversent car le calcaire ramené à la surface du sol par le labour réduit la vitesse de croissance des jeunes plants. Dans une étude sur l'impact de différents types de travaux du sol et de la végétation sur l'installation de semis dans trois pinèdes en région méditerranéenne, Prévosto *et al.* (2012) montrent que la régénération au bout de 6 - 9 ans est variable d'un peuplement à l'autre. Elle est peu abondante pour les traitements utilisant un broyage de branches du pin d'Alep et un brûlage peu intense et elle est faible ou nulle pour un peuplement témoin (sans intervention). En revanche, les plus fortes densités de semis s'observent pour un traitement par crochetage simple, contrairement au crochetage double qui n'apporte aucun effet favorable supplémentaire ainsi que le brûlage de forte intensité. Dans les parcelles trop dégradées où la régénération naturelle n'est plus possible, la reconstitution artificielle par semis-direct ou par plantation devient obligatoire (Alaoui *et al.*, 2011). Le travail du sol par crochetage ou par labour améliore la structure du sol et augmente les réserves en eau disponibles pour la survie des jeunes plants.

L'étude de Bchini *et al.* (2006) s'est intéressée particulièrement au comportement des jeunes plantations du pin d'Alep dans les forêts du Kef et de Kasserine. Elle consiste à faire une évaluation des travaux de préparation du sol dans un but de voir leurs effets sur le processus évolutif des pineraies. La figure 1 renseigne sur les variations en hauteur des plants en fonction de l'âge et des techniques de reboisement.

Bchini *et al.* (2006) montrent que la préparation mécanique du sol constitue une technique très favorable pour la réussite de la plantation du pin d'Alep. Nouri *et al.* (2006) ont conclu que la régénération du pin d'Alep sur des sols peu ou non évolués se trouve conditionnée par la préparation du sol et par la nature de la formation géologique en place.

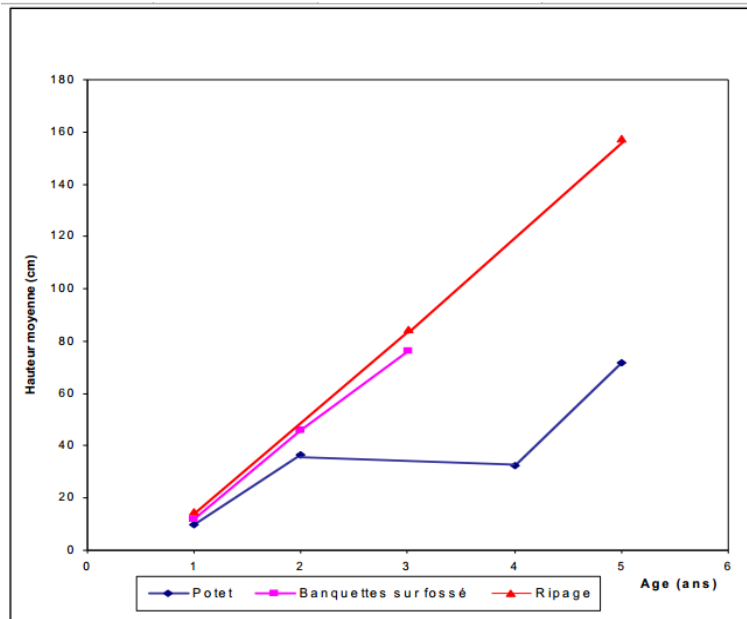


Figure 1: Hauteur des plants de pin d'Alep en fonction des travaux de préparation du sol. (Bchini *et al.* 2006).

3.2. Régénération artificielle et qualité des plants utilisés

En Tunisie, la superficie reboisée en pin d'Alep est très importante et s'étend de Bizerte à Fernana au Nord et de Gabès à Gafsa au Sud, particulièrement sur les sols à dominance calcaire. Le pin d'Alep représente en superficie le cinquième de toutes les plantations artificielles réalisées en Tunisie depuis l'indépendance. La production des plants en pépinière est de l'ordre de 4 500 000 plants/an pour le pin d'Alep, mais peut varier notablement en fonction des programmes de reboisement. Les plants élevés en pépinière dans des sachets en polyéthylène ne doivent pas dépasser 10 mois pour éviter

l'enroulement des racines dans les sachets. La densité de plantation varie suivant les régions. Généralement, on adopte la densité de 2500 plants à l'hectare dans le Nord et le Centre du pays et celle de 1000 à 1500 plants dans le Sud. Dans les régions arides, on recourt à l'arrosage immédiatement après la plantation. La durée de l'arrosage doit couvrir la période sèche de la première année de plantation et peut éventuellement s'étendre à la deuxième saison sèche. Dans une étude sur la régénération artificielle par plantation du pin d'Alep dans la forêt d'Oum Jedour, Ben Salem (1975) a utilisé deux traitements appliqués au conteneur (sachet) d'élevage des plants avant de procéder à la plantation, le premier a consisté à enlever le sachet avant plantation et le deuxième à consisté à sectionner la base du sachet et à effectuer trois fentes longitudinales le long de la génératrice du sachet (fendillé). Du point de vue de la distribution du système racinaire, les sujets plantés après fendillement du sachet sont les meilleurs et leur comportement répond aux normes d'une bonne distribution racinaire. Ben Salem (1975) a conclu que la technique qui consiste à sectionner la base de sachet et à le fendiller le long de sa génératrice avant plantation, semble prometteuse et sa généralisation est à recommander dans tous les chantiers de reboisement en Tunisie.

Depuis 1997, la modernisation des pépinières forestières compte parmi les principaux objectifs de la nouvelle stratégie en matière de reboisement. Ceci a permis l'introduction de nouvelles technologies de production de plants en conteneurs sur des substrats à base de compost d'*Acacia cyanophylla* Lindl, en substitution au terreau forestier utilisé depuis des décennies dans les pépinières traditionnelles (Ammari *et al.*, 2005). L'amélioration des techniques de production des plants en pépinière s'est imposée comme un passage obligatoire, afin de pallier aux problèmes qui affectent directement la qualité, la survie et le devenir des plants dans le site de plantation. En évaluant le comportement sur sites de reboisement de jeunes plants de trois résineux dont le pin d'Alep, élevés dans des substrats différents, Ammari *et al.* (2005) ont montré que le substrat de culture, utilisé en pépinière a un effet significatif, sur la survie et sur la performance morphologique des plants, lors de leur installation pouvant être

prolongé sur une longue période allant jusqu'à quatre années. En plus de l'amélioration du taux de réussite, l'effet des substrats de culture affecte aussi les paramètres morphologiques et de croissance des plants comme la hauteur, le diamètre au collet, le nombre de verticilles et le nombre de branches (Paterson et Fayle, 1984).

D'après Ammari *et al.* (2006), le nombre de nouvelles racines émises pendant la durée de l'étude (30 jours en pépinière), leur élongation et leur poids ont varié d'un substrat à l'autre et ce sont les plants élevés dans un substrat à base de terreau forestier qui ont été les moins performants (Figure 2).



Figure 2: Etat de croissance en site de reboisement de jeunes plants du pin d'Alep produits sur un substrat à base de compost (à gauche) et sur terreau forestier (à droite) (Ammari *et al.* 2006).

Ammari *et al.* (2007) suggèrent le remplacement du terreau par des substrats à base de compost où les plants cultivés ont présenté des caractéristiques morphologiques et physiologiques satisfaisantes (Figure 3). D'après la figure 3, les substrats composés de 50 % de compost d'Acacia, de 15 à 20 % de sable grossier (S1) et de 20 à 30 % de granules de liège (S2) semblent présenter les meilleures caractéristiques après 88 et 223 jours de suivi et d'évaluation.

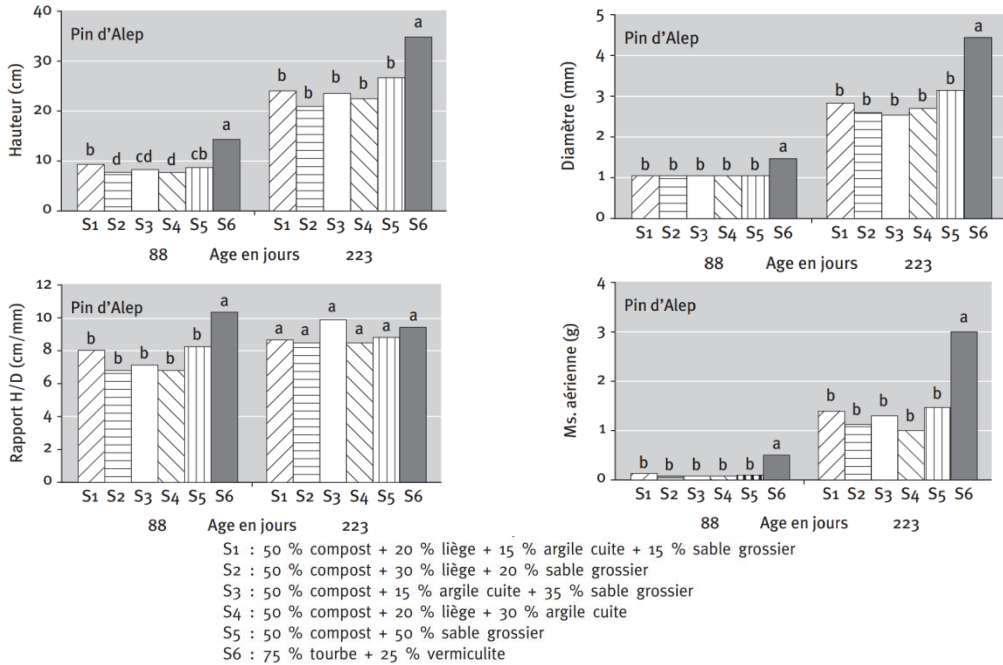


Figure 3: Evolution des variables de croissance (hauteur, diamètre au collet, rapport hauteur/diamètre et masse sèche aérienne) des plants de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), produits dans 6 substrats différents à 88 et 223 jours de croissance après germination (Ammari *et al.*, 2007).

Mguis *et al.* (2007), en étudiant la croissance du système racinaire chez le pin d'Alep pendant les premiers mois qui suivent la germination, ont montré que les graines germées ont rapidement développé leur système racinaire, avant même l'émergence des plantules et que le système racinaire est du type pivotant et peut atteindre une vitesse moyenne de 0,53 cm/j durant les 8 premiers mois après le semis. Cependant, la croissance des pivots en profondeur est périodique et plus importante durant la phase printanière. La production des racines secondaires est variable sur toute la longueur de la racine principale. Ainsi, le système superficiel est plus développé et très ramifié, ce qui lui permet d'exploiter les couches de surface. Mguis *et al.* (2007) ont conclu que le développement du pin d'Alep est rapide, dès les premiers mois après la germination, ce qui permet la réussite de son installation à l'état de jeunes plants. Hamrouni *et al.* (2011) ont montré que la germination du pin d'Alep *ex-vitro* dans la perlite s'est avérée plus efficace que celle obtenue en conditions *in-vitro* (taux

de germination supérieur à 90%). Sur un autre plan, si la multiplication par graines est facile, la multiplication végétative par bouturage s'est révélée, en revanche, plus difficile, contrairement à la culture *in-vitro* par micro-bouturage.

4. Densité du pin d'Alep après régénération

La densité de plantation à l'hectare dépend à la fois de la station et de l'espèce (Tschinkel, 1976). C'est un critère important dont dépend l'avenir du peuplement et la nature des opérations sylvicoles ultérieures. Dans les conditions semi-arides tunisiennes, Tschinkel (1976) considère que les écartements les plus convenables pour le reboisement du pin d'Alep sont 1,5 m x 5 m, correspondant à une densité de plantation de 1300 plants/ha. Sghaeir et Ammari (2012) rapportent qu'en adoptant une sylviculture moyenne, la densité des peuplements reste relativement élevée, dépassant les 600 tiges par hectare jusqu'à 80-90 ans d'âge et confirment que cette forte densité peut être expliquée par le fait que la forêt tunisienne a toujours été considérée comme une forêt de protection. L'espacement le moins concurrentiel entre les arbres se situe autour de 4 - 5 m, cet écartement permet aux arbres de croître convenablement. Le peuplement s'éclaircit au fur et à mesure pour arriver en fin de compte à un écartement moyen de 5 à 6 m pour un âge de 40 ans. Cependant, l'absence des travaux sylvicoles dans la majorité des peuplements rencontrés explique généralement leur forte densité. Gasdaoui (1981) et Nsibi (1997) ont classé les peuplements du pin d'Alep de la région de Kesra et de Sakiet en fonction de leur densité et de leur production en graines conformément au contenu du Tableau 2.

Les données du tableau 2 révèlent que la production en graines du pin d'Alep décroît avec la diminution de la densité du peuplement. Selon Orazio (1986), une densité de 2222 plants par hectare avec une disposition en rectangle (distance de 3m x 1,5m entre les plants) semble être la densité optimale. Letreuch (1991) suggère que la densité souhaitable serait de 1100 plants par hectare avec un espacement de 3,5m x 2,5m comme l'a suggéré le plan national de reboisement.

Tableau 2 : Production du pin d'Alep par classe de densité de la région de Kesra et Sakiet Gasdaoui (1981) et Nsibi (1997).

Classe de densité des peuplements	Production en cônes en kg/ha		Production en graines en kg/ha	
	Gasdaoui (1981)	Nsibi (1997)	Gasdaoui (1981)	Nsibi (1997)
Région	Kesra	Sakiet	Kesra	Sakiet
Densité supérieure à 300 arbres /ha	2727	2574	88,7	82,4
Densité comprise entre 200 et 300 arbres/ha	1703	1850	64,7	62,9
Densité inférieure à 200 arbres/ha	1457	1115	58,2	35,7

D'après Bentouati (2006), le nombre des tiges doit se stabiliser entre 700 et 900 tiges à l'hectare pour un âge compris entre 20 et 30 ans selon les stations. Ce choix est justifié par le fait que le pin d'Alep est une essence de lumière, par conséquent, il n'admet pas une densité très importante dans la majorité des cas et se caractérise relativement par une croissance assez lente. La densité de plantation est habituellement égale à 1100 tiges/ha en plaine et 830 tiges/ha dans les reboisements de montagne (Alaoui *et al.* 2011). L'action de la densité sur les paramètres dendrométriques du peuplement influe beaucoup plus sur le diamètre que sur la hauteur. L'augmentation de la densité, se traduit par un espacement plus réduit entre les arbres et conduit, par le phénomène de compétition inter arbres, à la diminution de leur croissance en diamètre et en hauteur et, par conséquent, à la diminution du volume et de la productivité de l'ensemble du peuplement (Cherak, 2010).

5. Régénération après incendie

Selon Nsibi (1979) sur 1868 ha de peuplements du pin d'Alep incendiés au cours des années 1990-1994, il a été enregistré 278 ha de forêt non régénérés soit 15 % de la superficie totale brûlée. Dans des peuplements adultes à fructification régulière, la régénération naturelle du pin d'Alep est tout à fait possible après incendie (Boudy, 1952 ; Seigue, 1985). Il a été même remarqué, qu'après incendie, les pinèdes à pin d'Alep ont souvent une régénération

massive, parfois s'étendant sur d'importantes surfaces avec une densité de plusieurs dizaines de milliers de semis à l'hectare (Boudy, 1950 ; Souleres, 1969 ; Sari, 1978). Ce phénomène a suscité la réalisation de nombreuses recherches, dans diverses régions du bassin méditerranéen, notamment par Karschon (1973), Abbas *et al.* (1984) et May (1987). Tous ces auteurs s'accordent à reconnaître une rapide recolonisation des surfaces brûlées par une abondante régénération naturelle du pin. Il apparaît également que la régénération naturelle est assurée grâce à un grand nombre de graines fertiles lâchées par les vieux cônes (4 ans et plus) indéhiscents dits "cônes sérotineux" et éjectés par le choc thermique provoqué par le feu (Abbas *et al.* 1984) sur de longues distances. Kadik (1986) dénombre jusqu'à 2720 plants à l'hectare âgés de 1-3 ans. Cette densité est comparable à la norme généralement utilisée dans le reboisement, qui est de 2000 plants/ha, correspondant à un espacement de 2,5 x 2 m (Letreuch-Belarouci, 1981). Cependant, des études comparables montrent que les densités obtenues sont nettement supérieures pouvant atteindre des dizaines de milliers de semis à l'hectare durant les 10 premières années (Tableau 3).

Tableau 3 : Données comparatives sur la régénération naturelle post-incendie du pin d'Alep.

Localité	Age (ans)	Densité Par ha	H max (cm)	Auteurs
Meurdja (Algérie)	4	42000	145	Meddour (1992)
Provence (France)	6	50000	100	Abbas <i>et al.</i> (1984)
Montpellier (France)	8	15000	107	Trabaud <i>et al.</i> (1985)
Andalousie (Espagne)	9	22000	-	May (1987)

Letreuch-Belarouci (1972) constate que la croissance du pin d'Alep est plus grande sur les terrains parcourus par le feu. Cette meilleure croissance est due à l'absence de compétition du couvert végétal détruit par le feu, à l'enrichissement du sol en éléments fertilisants apportés par les cendres et à l'activité plus intense du processus de nitrification de l'azote dans le sol (Le Houerou, 1980 ; Rego *et al.* 1987). La régénération des forêts du pin d'Alep après incendie dépend, en

particulier, de l'âge du peuplement et de la périodicité et de l'intensité du feu. En effet, d'après Rego *et al.* (1987), si le feu se déclare dans une forêt âgée de moins de 20 ans pour le pin d'Alep et (moins de 25 ans pour le pin maritime), le peuplement aura peu de chance de se renouveler et sera détruit. Sari (1978) cite le cas édifiant de la forêt du pin d'Alep de l'Oued Lardjem (Ouarsenis), qui malgré des incendies dévastateurs répétés et périodiques (au pas de temps de 21-22 ans), elle se présente, 10 à 15 ans après le dernier feu, en fourrés denses de 30000 à 45000 tiges/ha avec une hauteur de 2 à 2,5 m. En revanche, dans la pinède des Béni-Imloul (Aurès), Schoenenberger (1970) et Morandini (1970) constatent une absence totale de régénération, dans les trouées provoquées par les bombes de Napalm, (lâchées au cours de la guerre d'indépendance de l'Algérie) car les cônes ont été brûlés complètement avec l'embrasement des cimes sans pouvoir libérer leurs graines comme lors d'un incendie ordinaire. En fait, la régénération du pin d'Alep après incendie n'est possible qu'à condition que les cônes dispersés sur le sol ne soient pas totalement carbonisés avec leurs graines (Trabaud, 1980). Dans l'Est Algérien, Madoui (2013) a montré que les peuplements naturels de pin d'Alep se reconstituent rapidement et retrouvent leur composition floristique dès les premières années juste après incendie. Cette reconstitution est plus rapide en climat sub humide qu'en climat semi-aride. À l'Ouest algérien, Moravec (1990) a trouvé une densité variant entre 16 et 23 plants par 100 m², soit 1600 et 2300 plants par hectare à deux ans après feu ; alors qu'au centre algérien, Meddour (1992) donne une densité variant entre 6 et 84 plants par 20 m² ; soit 8000 et 42000 par ha, quatre ans après feu. Si, dans une zone donnée, la fréquence des incendies devient supérieure à 20 ans, le pin d'Alep ne sera pas capable ni de s'y maintenir, ni de la recoloniser et en sera donc complètement exclu (Quezel et Medail, 2003).

6. Conclusion

La régénération naturelle d'un peuplement consiste à remplacer plus ou moins rapidement les individus âgés par des cohortes d'arbres plus jeunes. La

pérennité de la forêt et la durabilité de l'écosystème qu'elle constitue en sont tributaires. Il s'agit d'une phase clé dans la vie d'un peuplement, attendu qu'elle va déterminer, sur le long terme, sa composition et sa structure. Le forestier est souvent désireux d'obtenir une régénération qui soit suffisamment abondante. En effet, obtenir une régénération la plus abondante possible constitue souvent un objectif affiché. Elle doit permettre, tout d'abord sur le plan écologique, le maintien de la pérennité des écosystèmes et leurs services écosystémiques, puis sur le plan sylvicole, de donner la possibilité au forestier d'opérer une sélection des individus qui lui semblent correspondre le mieux à ses objectifs économiques. La régénération naturelle des forêts du pin d'Alep est devenue très limitée et tributaire de circonstances favorables. Le recours à une régénération assistée par plantation artificielle peut constituer une alternative et une solution, mais il faut l'adopter en adéquation avec les facteurs du milieu. Dans des milieux convenablement choisis et à condition d'être exécuté correctement, le semis direct représente une méthode très simple, économique et prometteuse pour la régénération. Connaissant parfaitement les conditions du milieu, l'état du peuplement et sa dynamique, le forestier doit être en mesure de choisir le mode de régénération le plus approprié et le moins onéreux. En plus des méthodes de régénération naturelle ou assistée par plantation, le forestier dispose, avec le semis direct, d'un moyen efficace pour la sauvegarde des forêts du pin d'Alep de Tunisie.

Références bibliographiques

- Abbas H., Barbero M., Loisel R., 1984 - Réflexion sur le dynamisme actuel de la régénération du pin d'Alep dans les pinèdes incendiées en Provence. *Ecol. Médit.*, **10** (3/4) : 85-104.
- Acherar M., 1981 - *La colonisation des friches par le pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) dans les basses garrigues du Montpellier*. Thèse de doctorat, USTL Montpellier, 210p.
- Acherar M., Leparat J., Debussche M., 1984 - La colonisation des friches par le pin d'Alep en Languedoc méditerranéen. *Oecol. Plant.*, **5** (19) : 179-189
- Alaoui, A. Laariby S., Gmira N., 2011 - Production, croissance et modèles de conduite sylvicoles des principales essences (le pin maritime et le pin d'Alep) de reboisement au Maroc. *Journal of Forestry*. **11**(1): 68 – 84.

- Ammari Y., Lamhamedi M.S., Zine El Abidine A., Akrimi N., 2007 - Production et croissance des plants résineux dans différents substrats à base de compost dans une pépinière forestière moderne en Tunisie. *Rev. For. Fr. Biologie et Ecologie*. LIX - 4 - 239-258.
- Ammari Y., Akrimi N., Lamhammedi M., Zine El Abidine A., 2005 - Influence des substrats d'élevage sur la survie et la croissance de jeunes plants de résineux en site de reboisement. *Annales de l'INRGREF*, 7, Numéro Spécial, 217-228.
- Ammari Y., Lamhamedi M.S., Akrimi N., Zine El Abidine A., 2006 - Qualités physiologiques de jeunes plants de Pin d'Alep élevés en pépinière moderne sur différents substrats à base de compost. *Geo-Eco-Trop*, 30. 1: 11-24
- Barbero M., Bonin G., Loisel R., Miglioretti F., Quézel P., 1987 - Incidence of exogenous factors on the regeneration of *Pinus halepensis* Mill. after fires. *Ecol. Médit.*, 13 (4) : 51 - 56.
- Bchini M., Khaldi A., Belghazi B., Ezzahiri M., 2006 - Contribution à l'étude du comportement des jeunes plantations de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en relation avec les techniques de reboisement (cas des reboisements du Kef et de Kasserine - Tunisie). *Annales de l'INRGREF*, 9 (2), Numéro spécial, 9 -24.
- Bedel J., 1986 - Aménagement et gestion des peuplements de pin d'Alep dans la zone méditerranéenne française. *Options Méditerranéennes*. Série Etude CIHEAM 86/1, 127-156.
- Ben Salem B., 1975 - La régénération artificielle par plantation dans la forêt d'Oum Djeddour. Projet TUN-71/540. Renforcement et développement de l'INRF. Compte rendu des journées d'information. 26-30 p.
- Bentouati A., 2006 - *Croissance, productivité et aménagement des forêts de pin d'Alep (Pinus halepensis M.) du massif de Ouled Yagoub (Khenchela-Aurès)*. Doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques. Université El Hadj Lakhdar-Batna faculté des sciences. Département d'Agronomie. 116 p.
- Boudy P., 1950 - *Economie forestière nord-africaine. II. Monographies et traitement des essences forestières*. La rose, Paris, 887 p.
- Boudy P., 1952 - *Guide du forestier en Afrique du nord*. La maison rustique, Paris, 505 p.
- Burdett A.N., 1983 - Quality control in the production of forest planting stock, *Can. J. For. Res.*, 20: 41-427.
- Chakroun M.L., 1986 - Le pin d'Alep en Tunisie. CIHEAM - *Options Méditerranéennes*. 25-27.
- Cherak I., 2010 - *Facteurs d'échec et de réussite des reboisements de pin d'Alep dans trois stations : Ain-Touta, Tazoult et Bouilef*. Mémoire de magistère en Sciences Agronomiques. Université El Hadj Lakhdar. Batna. Faculté des Sciences. Département d'Agronomie. 107 p.
- D'hanens G., 1998 - Les peuplements mixtes de pin d'Alep et chênes en Provence. *Forêt méditerranéenne*. T XIX, N° 3, 261-266
- Douheret J., 1992 - Pin 'Alep ; Comment choisir une sylviculture ? *Forêt méditerranéenne*. TXIII. N° 3.

- El Hamrouni A., Sarson M., 1975 - Relation entre le couvert végétal et la régénération naturelle de *Pinus halepensis*. Note n : 7 de l'Institut National de Recherches Forestières de Tunisie.
- Gasdaoui M., 1981 - *Exploitation et commercialisation des graines de pin d'Alep (forêt de la Kesra)*. PFE. Institut Sylvo-Pastoral de Tabarka. 69 p.
- Goudelis G.P., Ganatsas T., Tsitsoni Y., Spanos E., Daskalakou M., 2008 - Effect of two successive wildfires in *Pinus halepensis* stands of central Greece. *Web Ecology* **8**: 30-34
- Hadri H., Tschinkel H., 1975 - La régénération de *Pinus halepensis* après coupe rase et sous peuplement. *Note de Recherches*. N : **09**. Institut National de Recherches Forestières.
- Hadri H., Tschinkel H., 1976 - Semis direct de pin d'Alep en Tunisie. *Annales de l'Institut National de Recherches Forestières*. Vol. **6**. Fasc. 1.
- Hamrouni L., Hanana M., Ghazi G., Aini R., Khouja M.L., 2011 - Essais de multiplication du Pin d'Alep. *Forêt méditerranéenne*. T XXXII, n° **3**. 271-276.
- Kadik B., 1986 - Etude des facteurs régissant la régénération naturelle du pin d'Alep dans le massif des Senalba (Atlas saharien). *Ann. Rech. Forest. Alg.*, **1**: 64-83
- Karschon R., 1973 - Natural regeneration after fire of Aleppo pine. Forestry direction agricultural research organization.
- Khouja M.L., 1997 - *Variabilité géographique du pin d'Alep en Tunisie perspectives d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois*. Thèse de Doctorat, UCL, Faculté des Sciences Agronomiques, Université Catholique de Louvain, Belgique, 181p.
- Khouja M. L., Sghaïer T., 2000 – Variabilité intraspécifique du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et possibilités de sélection à un stade précoce. *Annales de l'INRGREF*, **4**, p183-198.
- Khouja M. L., Sghaïer T., Nouri M. et André P., 2000 – Variabilité morphométrique du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et perspectives d'amélioration génétique. *Annales de l'INRGREF*, **4**, p78-118.
- Langley R., 1976 - Etude de la régénération naturelle du pin d'Alep en Tunisie centrale (Oum Djeddour). PROJET. TUN/540. Renforcement et développement de l'INRF.
- Le Houérou H.N., 1980 - L'impact de l'homme et de ses animaux sur la forêt méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne*, T II, N°1 : 31-44.
- Letreuch Belarouchi N., 1991 - *Les reboisements en Algérie et leur perspective d'avenir*. Volume .I. OPU. Alger. 294p
- Letreuch-Belarouchi N., 1972 - *Etude de la régénération du pin d'Alep (Djelfa)*. *Techniques sylvicoles*. Thèse ing. agro., I.N.A., Alger, 89 p.
- Letreuch-Belarouchi N., 1981 - *Les reboisements en Algérie et leurs perspectives d'avenir*. Thèse doct. ing. Gembloux, 588 p.
- Madoui A., 2013 - *Les incendies de forêts en Algérie. Étude de l'évolution après feu des peuplements de Pinus halepensis Mill. dans l'Est algérien. Cas de la forêt de Bou-Taleb, du reboisement de Zenadia et du parc national d'el Kala*. Doctorat en sciences. En Biologie Option Écologie Végétale. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

- Département de Biologie et d'Écologie Végétale. Université Ferhat ABBAS de Sétif. Algérie. 104 p + Annexes.
- May T., 1987 - L'état de la végétation 9 ans après l'incendie d'un reboisement de *Pinus halepensis* en Andalousie orientale. *Forêt Méditerranéenne*. T IX, N°2: 139-142.
- Meddour R., 1992 - Régénération naturelle de *Cedrus atlantica* Man. et de divers pins après incendie dans l'arboretum de Meurdja (Algérie). *Forêt méditerranéenne*. T XIII, N° 4, 275-287.
- Mguis K., Ksontini M., Albouchi A., Rejeb M.N., 2007 - Etude comparative de la croissance du système racinaire chez le pin d'Alep et le caroubier. *Annales de l'INRGREF*. 10, 53-64.
- Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire Tunisien (MEAT). 1999 - *Etude de suivi - évaluation des actions de reboisement forestier et pastoral et de fixation des dunes dans le nord ouest*, 67p.
- Ministère de l'Environnement et l'Aménagement du Territoire (MEAT) - 1998 - Aperçu sur les ressources naturelles en Tunisie, 6p.
- Morandini R., 1970 - Note sulla foresta di Béni- Imloul. Ann. Ist. sper. selv., 1 : 365-386.
- Moravec J., 1990 - Regeneration of NW African *Pinus halepensis* forests following fire. *Plant Ecology* **87**(1): 29-36.
- Neveux M., Duhén L.M., Corti J.M., Devallois P., Fontanel J.L., Boiseau P., 1986 - Plaidoyer pour une sylviculture du Pin d'Alep Par les techniciens du terrain. *Forêt méditerranéenne*. T VIII, N° 1.
- Nouri M., Khaldi A., Jelleli M., Abid H., 2006 - Impacts des reboisements mécanisés sur l'accroissement du pin d'Alep et sur l'amélioration des conditions édaphiques. *Annales de l'INRGREF*, **9** (2), Numéro spécial, 25-37.
- Nsibi R., 1997 - *Relation entre le couvert végétal et la régénération naturelle des forêts de pin d'Alep dans la région de Sakiet Sidi Youssef*. DEA. Université de Tunis II. Faculté des Sciences de Tunis. 74 p + Annexes.
- Orazio C., 1986 - Sylviculture du pin d'Alep. *Options Méditerranéennes*. Série. Etude CIHEAM 86/1, 47-54.
- Paterson J.M., Fayle D.C.F., 1984 - Early prediction of plantation performance for red pine. *For. Chron*, **60**, 340-344.
- Prévosto B., Amandier L., Quesney T., Boisgelin G., Ripert C., 2012 - Régénérer efficacement les peuplements de pin : des travaux souvent indispensables ! L'exemple des peuplements à pin d'Alep en zone méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne*. T XXXIII, N° 4. 319-328.
- Quezel P., Médail F., 2003 - Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Paris, pp. 28-125
- Rego A., Botelho H., Bunting S., 1987 - Prescribed fires effects on soils and vegetation in *Pinus pinaster* forests in northern Portugal. *Ecol. Médit.*, **13** (4) : 189-194.
- Sari D., 1978 - Le reboisement de l'Ouarsenis. in : *Recherches sur l'Algérie, Mémoires et documents*, vol. **17**: 101 - 164.
- Schoenenberger, A., 1970 - Etude du couvert forestier de l'Aurès oriental. F.A.O., projet Algérie 15, 42 p.

- Seigue A., 1985 - *La forêt circum méditerranéenne et ses problèmes*. Maison neuve et la rose, Paris, 502 p.
- Sghaeir T., Ammari Y., 2012 - Croissance et production du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Ecologia Mediterranea* - Vol. **38** (1). 39-57.
- Snane M.H., Mechergui M., Hamza E., 1992 - Dynamique de la croissance juvénile du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) sous deux techniques de reboisement dans la zone subhumide du Cap-Bon tunisien. *Forêt Méditerranéenne*. T : XIII, n° **3**. 262-267.
- Souleres G., 1969 - Le pin d'Alep en Tunisie. *Annales de l'I.N.R.F.*, Tunis vol. **2** (1) : 1 - 126.
- Trabaud L., 1980 - *Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l'organisation, la structure et l'évolution de la végétation des zones de garrigues du Bas-Languedoc*. Thèse Doct. d'Etat, Montpellier, 290 p.
- Tschinkel H., 1976 - Effets de l'élimination de la végétation concurrente sur l'humidité du sol et su, la réussite des reboisements avec *Pinus halepensis*. Note de Recherches. N : 11. Institut National de Recherches Forestières.
- Zine El Abidine, A., 1993 - *Les relations hydriques et les échanges gazeux de quatre populations d'Épinette noire (Picea Mariana (Mill) B.S.P.) en relation avec leur tolérance au stress hydrique*. Ph. D. thèse, Université Laval, Québec-Canada, 165 p.
- Zine El Abidine A., 2003 - Le dépérissement des forêts au Maroc. Analyse des causes et stratégie de lutte. *Sécheresse*, **14** (4), 209-218.

CHAPITRE 9

La sylviculture du pin d'Alep en Tunisie

**Wahbi Jaouadi^{1 et 2}, Naceur Boussaidi¹, Kaouther Mechergui^{1 et 2}, Ali Aloui³,
Messaoud Meliane³, Sabri El Wellani⁴ et Mohamed Larbi Khouja²**

¹Institut Sylvo-Pastoral de Tabarka. 8110 Tabarka. Tunisie

²Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts. BP. 10. Rue Hédi Karray. Ariana
2080. Tunisie

Université de Carthage, Tunisie

³Expert international en Aménagement et Sylviculture des Forêts

⁴Direction Générale des Forêts, Arrondissement de Nabeul. Tunisie

Résumé. Le présent chapitre traite de l'étude de la sylviculture du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Miller) et vise une meilleure connaissance de ses potentialités productives en Tunisie. Les résultats montrent que la pinède à pin d'Alep se présente sous forme de futaies plus au moins régulières à l'état pur sur 92,6% de la superficie de cette pinède et en mélange avec d'autres espèces forestières spontanées sur 1,2% ou introduites sur 6,1 % de sa superficie. Dans les forêts du pin d'Alep en Tunisie, la densité forte des peuplements a induit, dans la plupart des cas, un élagage naturel sur 2 à 3 m du sol. Il est recommandé que l'opération d'élagage artificiel se limite uniquement aux 400 ou 500 arbres de choix du peuplement final, les autres arbres devront seulement être élagués jusqu'à la hauteur de poitrine d'homme (1,30 m à partir du sol). L'intensité des éclaircies devrait se situer entre 40 et 50 % dans un éventail de 25 % pour les peuplements relativement clairs (densité inférieure à 1500 tiges/ha) et 60 % pour les peuplements issus d'incendies (densité entre 25000 à 30000 tiges/ha). La périodicité des éclaircies peut se décider avec une rotation fixée tous les 10 ans. Le choix d'éclaircie par le bas est dicté par le caractère plus ou moins jeune de la pinède tunisienne où plus de 70 % des peuplements ont moins de 60 ans d'âge. Les éclaircies systématiques, adoptées souvent pour des raisons de facilité, ont malheureusement l'inconvénient d'éliminer les arbres d'avenir. Si cette pratique peut être tolérée pour des plantations linéaires denses (plus de 2000 tiges/ha) avec un sous-bois fermé, il est impératif de n'envisager dans l'avenir que les éclaircies sélectives par le bas, travaillant au profit des élites. L'âge de l'exploitabilité du pin d'Alep est à environ 50 ans pour la première classe de productivité, correspond à 80 ans pour la deuxième classe et dépasse les 100 ans pour la troisième classe. La durée de l'application de l'aménagement est généralement fixée à 20 ans, le quartier de régénération couvrirait en moyenne le 1/5 de la contenance totale de la série à aménager. Le pin d'Alep en Tunisie a un rôle de protection de l'environnement et ce rôle est beaucoup plus important que celui de la production. Cependant, devant la demande en graines qui ne cesse d'augmenter d'une année à l'autre, la production des graines devient un créneau fort prometteur. Une sylviculture orientée vers la production commerciale des graines ne pourrait que valoriser davantage cette espèce et mieux la conserver.

Mots clés : pin d'Alep, *Pinus halepensis*, sylviculture, élagage, éclaircie, régénération.

Abstract. Silviculture of Aleppo pine in Tunisia. The objective of the work is the study of the silviculture of the Aleppo pine (*Pinus halepensis* Miller) and aims at a better knowledge of its productive potentialities in Tunisia. The results show that stands of Aleppo pine are in the form of more or less regular mature trees in their pure state on 92.6% of the area of this pine forest and in mixture with other forest species spontaneous on 1, 2% of the area or introduced on 6.1% of its area. In the Aleppo pine forests in Tunisia, the high density of stands has in most cases led to natural pruning 2 to 3 m above the ground. It is recommended that the artificial pruning operation be limited to only the 400 or 500 trees of choice of the final stand, the other trees will only have to be pruned to the height of man's chest. The intensity of thinnings should be between 40 and 50% in a range of 25% for relatively clear stands (density less than 1500 stems/ha) and 60% for stands resulting from fires (density between 25000 to 30000 stems/ha). The periodicity of the thinnings can be decided with a fixed rotation every 10 years. The choice of thinning from the bottom is dictated by the more or less young character of the Tunisian pine forest where more than 70% of the stands are less than 60 years old. This systematic thinning often adopted for reasons of ease, unfortunately has the disadvantage of eliminating the trees of the future. If this practice can be tolerated for dense linear plantations (more than 2000 stems/ha) with a closed undergrowth, it is imperative to envisage in the future only selective thinning from the bottom, working for the benefit of elites. The age of exploitability of Aleppo pine for the first class of productivity is about 50 years, it corresponds to 80 years for the second class and exceeds 100 years for the third class. The duration of the application of the development is generally set at 20 years, the regeneration quarter would cover on average 1/5 of the total capacity of the series to be developed. The Aleppo pine in Tunisia has a role of environmental protection much more important than that of production. However, in the face of ever-increasing seed demand from one year to the next, seed production has become a very promising niche. Silviculture oriented towards the commercial production of seeds could only enhance this species and better preserve it.

Keywords: Aleppo pine, *Pinus halepensis*, silviculture, pruning, thinning, regeneration.

1. Introduction

Selon le dernier inventaire forestier national (DGF, 2010), les peuplements du pin d'Alep se présentent sous forme de futaies plus au moins régulières à l'état pur sur 92,6% de la superficie de ces peuplements et en mélange avec d'autres espèces forestières spontanées sur 1,2% ou introduites sur 6,1 % de sa superficie (Tableau 1).

Tableau 1 : Etat des forêts du pin d'Alep en Tunisie et superficies correspondantes (DGF, 2010)

Etat des peuplements	Superficie (ha)
pin d'Alep pur	361222
pin d'Alep + Genévriers	13557
pin d'Alep + Thuya	5050
pin d'Alep + Cyprès	1403
pin d'Alep + Pin pignon	1137
pin d'Alep + Pin maritime	77
pin d'Alep + Eucalyptus	3814
pin d'Alep + Chêne vert	2220
pin d'Alep + Eucalyptus+ Genévriers	534
pin d'Alep + Cyprès + Eucalyptus	453
pin d'Alep + Chêne liège	277
pin d'Alep + Eucalyptus + Thuya	134
pin d'Alep + Cyprès + Acacia	24

Sous l'action des incendies, des massifs entiers de pin d'Alep se trouvent à l'état de bas perchis où le nombre de tiges à l'ha atteint 7000 à 15000 dans la forêt de Sakiet et plus de 25000 dans la forêt de Touiref. Avec ces densités excessives, les tiges sont à l'état filiforme et les accroissements moyens en hauteur et en diamètre ne dépassent pas respectivement 7 et 0,25 cm/an (Belghazi, 1998). De nombreuses forêts de pin d'Alep proviennent de plantations artificielles. Les techniques de reboisement ont connu une nette amélioration après l'avènement du Projet de Développement Forestier en 1988 (PDF1). Avant cette période, les travaux étaient seulement manuels et les plantations se faisaient avec une densité de 2500 tiges/ha. Cette densité excessive qui est, en fait à la faveur des sylviculteurs, n'a malheureusement pas été exploitée convenablement. L'absence ou le manque de traitements sylvicoles se sont traduits par un impact négatif sur la croissance des arbres, sur la production des peuplements et sur la qualité des produits récoltés. A partir de 1988, les densités des plantations étaient réduites à 1600 plants/ha et on avait recouru à la mécanisation dans la préparation du sol, surtout dans les stations les plus riches. Avec ces nouvelles techniques, on s'attendait à une meilleure productivité, qui pourrait atteindre 6 à 8 m³/ha/an (Jalel, 1996).

Le présent chapitre comprend une synthèse bibliographique des travaux spécifiques touchant à la sylviculture de l'espèce. Ces travaux sont axés essentiellement sur les traitements et les techniques sylvicoles utilisés en vue

d'assurer une gestion optimale et durable et une exploitation rationnelle des peuplements forestiers du pin d'Alep en Tunisie.

2. Les techniques sylvicoles utilisées dans la futaie régulière

2.1 Les soins culturaux

Plusieurs soins sylvicoles sont conseillés avant que les peuplements n'atteignent le stade de perchis : on cite les dépressages des semis, les dégagements des fourrés et les nettoiemnts des gaulis. Tous ces travaux devraient être pratiqués avant que le diamètre moyen des peuplements n'atteigne 10 cm pendant la première vingtaine et jusqu'à la première trentaine d'années. Souvent ces travaux sont négligés parce qu'ils ne permettent pas de récolter des produits commercialisables. Ces traitements souvent négligés occasionnent la constitution de peuplements très fragiles avec des tiges grêles, à petites cimes et avec un enracinement superficiel et peu développé.

2.2. Les éclaircies

Les éclaircies sont, en premier lieu, des traitements d'amélioration des structures des peuplements forestiers en croissance, afin de les faire évoluer continuellement vers des structures optimales pour les peuplements matures, en adéquation avec les facteurs de production et de leur évolution. Elles donnent lieu, par ce fait, à des prélèvements ligneux ou produits intermédiaires qu'il soit possible de commercialiser. Les prélèvements des premières éclaircies sont très faibles par unité de surface et en même temps fournissent des produits de très mauvaise qualité ne trouvant pas souvent d'acheteurs. Pour un peuplement forestier, l'éclaircie permet une meilleure disponibilité en eau pour les arbres (Breda *et al.* 1995 ; Ducrey et Huc 1999 ; Jiménez *et al.* 2008) et diminue l'amplitude et la durée du stress hydrique (Aussenac, 1987). D'après Donner et Running (1986) et Misson *et al.* (2003), l'amélioration de la résistance des arbres à la sécheresse est observée au moins dans le court terme (5 ans environ après

éclaircie). En réalité, il n'existe pas de régime d'éclaircie idéal, applicable pour l'ensemble des peuplements forestiers, car chaque peuplement possède une situation bien particulière en relation avec les caractéristiques écologiques de la station. Cependant, dans une même parcelle, on pratique plusieurs coupes d'éclaircie successives avant les coupes de régénération (Alaoui *et al.* 2011).

2.2.1 Intensité et rotation des éclaircies

Dans une étude sur les opérations sylvicoles dans les peuplements de pin d'Alep en Tunisie, Belghazi (1998) a constaté que l'intensité de l'éclaircie est très variable selon la densité du peuplement. En effet, il a montré qu'en moyenne, l'intensité des éclaircies devrait se situer entre 40 et 50 % dans un éventail de 25 % pour les peuplements relativement clairs (densité inférieure à 1500 tiges/ha) et 60 % pour les peuplements issus d'incendies (densité entre 25000 à 30000 tiges/ha). Belghazi (1998) mentionne que les tiges issues d'incendie sont encore de faibles calibres et que les coupes d'amélioration sont plutôt des coupes de cloisonnement dont le principe consiste à exploiter des bandes d'une largeur de 2 m, et d'éliminer dans les inter-bandes de 7 m, tous les sujets de diamètres, à 1,30 m du sol, inférieurs à 5 cm. Ladurner (1997) suggère que les stations médiocres du pin d'Alep en Tunisie ne méritent pas d'être éclaircies et recommande de limiter les interventions en les orientant vers la conservation du peuplement et en favorisant la fonction de protection au détriment de la production. En relation avec la vitesse de croissance des peuplements, Belghazi (1998) a conclu que la périodicité des éclaircies peut se décider avec une rotation fixe tous les 10 ans. Pour Boudy (1952) elle varie, en général, de 6 à 15 ans. La rotation fixe peut être appliquée sans problème pour tous les peuplements artificiels, puisqu'elle est la plus facile et plus maniable pour le sylviculteur. Bentouati (2006) signale qu'en Algérie le pin d'Alep présente une croissance juvénile très importante et que cette observation est confirmée par les analyses de tiges. De telles analyses montrent que le gain en hauteur est de 20 cm/an au cours des 40 premières années, approche les 15 cm/an entre 40 et 80 ans et tend à diminuer progressivement pour atteindre 5 cm/an après 100 ans.

Cette dynamique de croissance en hauteur a conduit à opter pour des éclaircies de rotation uniforme de 10 ans, et c'est cette même rotation qui a été appliquée pour la construction des tables de production du pin d'Alep en Espagne (Montero *et al.*, 2001). Quant à Frantz et Forster (1979), ils ont adopté, pour les Béni-Imloul (Algérie), une rotation de 5 ans, tandis que Couhert et Duplat (1993) ont choisi plutôt une rotation variable suivant les classes de fertilité adoptées en France. Au Maroc, Alaoui *et al.* (2011) distinguent deux types de rotation:

- une rotation fixe qui peut être adoptée à un âge allant de 5 à 10 ans. Elle est d'application facile mais ne suit pas la croissance du peuplement ;

- une rotation mobile pouvant être déterminée en fonction du gain en hauteur dominante (2 à 3 m), ou lorsque celle-ci aurait gagné 10 % sur sa valeur par rapport à l'éclaircie précédente. Ces éclaircies, qui tiennent compte de l'évolution des peuplements, sont dans la pratique difficile à adopter. D'après Alaoui *et al.* (2011), les programmes d'éclaircie du pin d'Alep, en reboisement et en peuplement naturel, sont précisés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Norme d'éclaircie du pin d'Alep en reboisement et en peuplement naturel au Maroc (Alaoui *et al.* 2011).

Éclaircie	Age (ans)	H (m)	N (tiges/ha) avant éclaircie	N (tiges/ha) après éclaircie	Circ. (cm)	Utilisation
Reboisement de Rommani						
1 ^{er} éclaircie	15	07,8	1100	367	42,2	Bois de mine
2 ^{er} éclaircie	20	10,8	733	244	46	Bois d'industrie
3 ^{er} éclaircie	25	13,1	489	163	57	Bois d'industrie
4 ^{er} éclaircie	30	14,9	326	109	68,4	Bois d'industrie
Coupe définitive	35	16,4	217	217	97,8	Bois d'œuvre
Peuplement naturel de Zerkten-Amez Miz						
1 ^{er} éclaircie	60	9,8	427	142	78	Bois d'œuvre
2 ^{er} éclaircie	70	10,6	285	95	91	Bois d'œuvre
Coupe définitive	80	11,3	190	190	98	Bois d'œuvre

N : Nombre ; H. : Hauteur ; Circ. : Circonférence.

2.2.2 Les types d'éclaircie

Pour la Tunisie, le choix d'éclaircie par le bas est dicté par le caractère plus ou moins jeune de la pinède tunisienne où plus de 70 % des peuplements ont moins de 60 ans d'âge (Sghaier et Ammari, 2012). En Algérie, Bentouati (2006) a estimé qu'une éclaircie interviendrait pour enlever les arbres dominés et sans avenir et travaillerait au profit des élites. En France, Couhert et Duplat (1993) ont préconisé une forte intensité d'éclaircie et un rapport d'éclaircie de 0,85 qui enlèverait à 60 ans 43 % du nombre d'arbres pour la première classe de fertilité et jusqu'à 60 % pour la dernière. Dans le massif des Béni-Imloul, Frantz et Forster (1979) ont pratiqué aussi une éclaircie forte par le haut, ce choix est justifié principalement par l'âge avancé de la majeure partie de la pinède et par l'état sanitaire des arbres, fortement attaqués par le polypore. En Algérie, le régime de gestion suggéré par Bentouati (2006) suit le calendrier des éclaircies présenté dans le tableau 3.

Tableau 3: Calendrier des éclaircies proposé pour la pinède de Ouled Yagoub (Bentouati *et al.*, 2006).

Age	30 ans	50 ans	70 ans	Entre 70 et 90 ans
Nombre d'arbres/ha après éclaircie	700	380	260	Coupe finale : en moyenne 200 arbres/ha à récolter

Le type d'éclaircie est représenté généralement par le coefficient d'éclaircie k défini par Rondeux (1993) comme étant le rapport du volume moyen des arbres éliminés en éclaircie (V_e) au volume moyen des arbres du peuplement avant éclaircie (V):

$$k = V_e/V$$

Ce rapport caractérise le type de l'éclaircie et indique si celle-ci est effectuée par le haut (arbres dominants) ou par le bas (arbres dominés). Pour une éclaircie par le haut, le coefficient d'éclaircie k s'approche de la valeur 1, et dans le cas d'éclaircie par le bas, il est de l'ordre de 0,7 - 0,8 (Schütz, 1990). Le rapport de l'éclaircie est fixé à 0,7 en Tunisie et à 0,65 pour l'Algérie (Shgaeir et Ammari, 2012 ; Bentouati, 2006). Le choix d'un tel rapport est justifié par la

jeunesse de la majorité des peuplements de la pinède existant dans les deux pays.

En règle générale, les intensités des coupes d'éclaircie sont plus faibles pour les essences d'ombre et fortes pour les essences de lumière. De plus, les éclaircies peuvent être plus fréquentes et plus fortes dans des peuplements jeunes ou à très haute production que dans des peuplements âgés ou à faible production (les arbres jeunes referment plus vite leur couvert que les arbres âgés). D'après .Sghaier et Ammari (2012), l'application de l'indice d'espacement établi par Hart-Becking permet de doser les éclaircies tout le long de la vie d'un peuplement et de contrôler la compétition entre les arbres et d'assurer les conditions les plus favorables de croissance. Cela se traduit par une amélioration qualitative du produit final, donnant des tiges de dimensions plus importantes, donc de valeurs économiques plus intéressantes. Au Maroc, l'intensité des éclaircies est réglementée par l'élimination de 1/3 des arbres à chaque passage (Alaoui *et al.*, 2011). Dans la littérature forestière, le coefficient d'espacement forestier de Hart-Becking est un critère synthétique qui tient compte à la fois de la fertilité de la station (hauteur dominante définie comme étant la hauteur moyenne des 100 plus gros à l'ha) et de l'espacement entre les arbres du peuplement. Son expression est la suivante :

$$S\% = (a/H_d) \times 100$$

Où : a = écartement moyen entre les arbres ; H_d=hauteur dominante

Le tableau 5 représente les densités appliquées dans le cas des peuplements résineux en Tunisie (Belghazi, 1998).

Tableau 5: Densité à l'ha en fonction du coefficient d'espacement de Hart-Becking (S en %) et de la hauteur dominante (H_d en m) (Belghazi, 1998).

S (%)	Hauteur dominante (m)					
	6	8	10	12	14	16
15	14256	8019	5132	3564	2618	2005
20	8019	4511	2887	2005	1473	1128
25	5132	2887	1848	1283	943	722
30	3564	2005	1283	891	655	501
40	2005	1128	722	501	368	282

D'après Sghaier et Ammari (2012), l'indice d'espacement de Hart-Becking observé dans le peuplement du pin d'Alep en Tunisie varie de 28 à 41 % pour la classe de productivité I (classe de 13,5 m) et l'indice d'espacement de Hart-Becking estimé varie de 19 à 50 % pour la même classe. Sghaier et Ammari (2012) ont conclu que le pin d'Alep est une essence de lumière, il ne permet pas une densité de peuplements très importante dans la majorité des cas et se caractérise relativement par une croissance assez lente. Belghazi (1998) signale que les éclaircies systématiques, adoptées souvent pour des raisons de facilité, ont malheureusement l'inconvénient d'éliminer les arbres d'avenir. Si cette pratique peut être tolérée pour des plantations linéaires denses (plus de 2000 tiges/ha) avec un sous-bois fermé, il est impératif de n'envisager dans l'avenir que les éclaircies sélectives par le bas, travaillant au profit des élites. Les intensités d'éclaircie sont parfois fortes (plus de 60 %) et les dégâts occasionnés par le vent après l'ouverture des peuplements (chablis) sont préjudiciables à leur maintien et peuvent être fatales. Les intensités des éclaircies, fixées selon le coefficient d'espacement le mieux adapté à l'espèce, permettent de mieux réguler les effectifs par hectare en respectant bien les fertilités des stations. Pour les essences de lumière, comme le pin d'Alep, un coefficient d'espacement autour de 50% serait bien adapté à la pinède tunisienne.

2.3. Elagages du pin d'Alep

Si les éclaircies ont une incidence marquée sur la vitesse de croissance des peuplements (nutrition, lumière), les élagages sont par contre déterminants quant à la qualité technologique du bois. Pour une espèce à forte ramification, un bois non élagué présente une valeur moindre et ne peut faire l'objet que d'usages secondaires. Dans le cadre du projet PDF II, Belghazi (1998) montre que dans l'ensemble des forêts du pin d'Alep en Tunisie, la densité forte des peuplements a induit, dans la plupart des cas, un élagage naturel sur 2 à 3 m du sol. Selon les directives de la DGF, les élagages sont toujours associés aux coupes d'éclaircie. Pour l'élagage du pin d'Alep en Tunisie, les gestionnaires appliquent une intensité d'élagage égale au tiers de la hauteur totale de l'arbre.

Belghazi (1998) recommande de respecter l'âge de l'arbre au moment du premier élagage, dit aussi élagage de pénétration. Les élagages suivants, selon un calendrier similaire des éclaircies, ne doivent concerner que les arbres d'avenir et la hauteur d'élagage ne doit pas excéder 40 à 45 % de la hauteur totale des arbres, pour plafonner à 50 % au dernier élagage. En France, selon Couhert et Dulpart (1993), l'élagage devrait être réservé aux peuplements du pin d'Alep de bonne croissance et limité aux 200 tiges du peuplement destiné à l'exploitation finale. Couhert et Dulpart (1993) montrent que la hauteur d'élagage du pin d'Alep ne doit pas dépasser 3 m pour une hauteur dominante de 6 m, un diamètre à 1,30 m de 10 à 12 cm à un âge d'intervention situé entre 16 et 25 ans. Ladurner (1997) recommande, pour les peuplements Tunisiens du pin d'Alep, d'utiliser des scies ou des ciseaux d'élagage, car les haches qui sont utilisés le plus souvent causent des dégâts préjudiciables sur les arbres. Il recommande aussi que l'opération d'élagage doit se limiter uniquement aux 400 ou 500 arbres de choix du peuplement final, les autres arbres devront être seulement élagués jusqu'à la hauteur d'homme. Khouja *et al.* (1999) montrent qu'un élagage pratiqué sur du pin d'Alep à un âge précoce (2 ans) réduit significativement la croissance des arbres et il n'est pas donc recommandé d'élaguer les plantations à un âge relativement jeune. Au Maroc et selon Alaoui *et al.* (2011), un élagage jusqu'à 60 à 70 % de la hauteur de l'arbre peut être dommageable et peut causer son affaiblissement ou son dépérissement, alors que l'élagage au tiers de la hauteur peut être effectué sans problème. D'une manière générale, au-delà de ce seuil, certaines espèces réagissent négativement, soit par perte de leur statut social (dominant, dominé) soit par dépérissement. Pour que la cicatrisation des blessures provoquées par l'élagage soit rapide et afin d'avoir des sujets sans nœuds ou avec des nœuds acceptables de petit diamètre, qui disparaissent avec l'âge, il est recommandé de faire des élagages à un moment où les branches ont un diamètre inférieur à 3 cm. Ce diamètre correspond, généralement, à un âge de 3 à 6 ans. L'opération peut être répétée par la suite, tous les 5 à 10 ans, tant que le peuplement est en croissance et les branches fines continuent à pousser. La période de l'élagage devrait s'étendre de la fin d'hiver au début du printemps. L'époque optimale d'élagage correspond à la fin de l'hiver et le début du

printemps, c'est en cette période que la cicatrisation est la plus rapide. Alaoui *et al.* (2011) recommandent d'éviter les élagages en période de pleine sève car le flux de sève est tellement fort que cela peut engendrer des écoulements importants, pouvant bloquer la cicatrisation. Le tableau 6 permet de donner des précisions sur la périodicité et les normes d'élagage pour le pin d'Alep en reboisement à Tetaouan (Maroc).

Tableau 6: Périodicité et normes d'élagage pour le pin d'Alep en reboisement à Tetouan-Maroc (Alaoui *et al.* 2011).

Elagage	Age (ans)	Densité (tiges/ha)	Hauteur totale (m)	Hauteur élagage (m)
1 ^{er} élagage	5	800	3,4	1,1
2 ^{er} élagage	10	800	5,3	1,8
3 ^{er} élagage	15	800	6,8	2,3
4 ^{er} élagage	20	533	8,2	2,7
5 ^{er} élagage	25	533	9,5	3,2

3. Age d'exploitabilité du pin d'Alep

L'âge où convergent les courbes d'accroissement annuel courant (AAC) et d'accroissement annuel moyen (AAM), au point culminant de l'AAM, est l'âge utilisé pour fixer la révolution des peuplements équiennes dans l'aménagement forestier classique, car c'est en utilisant cette révolution qu'on peut maximiser la production ligneuse sur une unité de surface donnée (Clutter *et al.* 1983 ; Davis and Johnson, 1987 ; Davis *et al.* 2001). L'âge d'exploitabilité du pin d'Alep en Tunisie correspond, d'après Chakroun (1986), au diamètre moyen de 30 cm. Selon Bentouati (2006), il est fixé entre 70 et 90 ans en fonction des classes de fertilité. Sghaier et Ammari (2012) montrent que, pour le pin d'Alep en Tunisie, l'âge de l'exploitabilité pour la première classe de productivité est à environ 50 ans, il correspond à 80 ans pour la deuxième classe et dépasse les 100 ans pour la troisième classe. Le décalage de l'âge d'exploitabilité d'une classe de productivité à une autre est un phénomène naturel chez toutes les espèces forestières, il est lié à la vitesse de croissance des arbres.

4. Sylviculture du pin d'Alep après incendie

En ce qui concerne les incendies, il est connu que le pin d'Alep est très sensible au feu et sa régénération est favorisée par l'éclatement des cônes. La dissémination des graines est favorisée par le vent et les animaux et la germination commence après les premières pluies, vers la fin de l'été et peut s'étaler pour le reste de l'année (Vennetier, 2003). La régénération naturelle issue, après incendie, produit les premières années un gaulis très dense. Cette densité excessive cause un ralentissement de l'accroissement par suite de la concurrence des jeunes plants entre eux pouvant aller jusqu'au dépérissement du peuplement. Il faut dans ce cas intervenir le plus tôt possible par des opérations de dépressage afin de diminuer le nombre de semis et régulariser la densité. La mise en défens est obligatoire dans les parcelles jeunes. Les opérations d'amélioration doivent être graduelles et répétées à des intervalles courts.

5. Aménagement des forêts de pin d'Alep

Le pin d'Alep est traité en futaie régulière. Ce type de traitement, rend économiquement possible les interventions d'éclaircie (volume de la coupe et prélèvement à l'hectare suffisants, homogénéité des produits). Dans les séries de protection, paysagère ou d'accueil du public et dans le cas où des motifs spécifiques le justifieraient, la futaie par parquets de 0,5 à 2 hectares pourrait être préférée à la futaie régulière (Vennetier *et al.*, 2010). D'après une étude faite par Bentouati *et al.* (2006), sur une forêt naturelle structurée par bouquet dans les Aurès (Algérie), le type de régime qui conviendrait mieux pour ce type de forêt est la futaie par parquet. La régénération est pratiquée par coupe rase sur de petites surfaces dans les peuplements arrivés à maturité. Les trouées dans le peuplement du pin d'Alep s'agrandissent au fur et à mesure de l'évolution du semis accompagnée d'une mise en défens de 10 à 20 ans. En Tunisie, le régime de la futaie régulière semble le plus approprié à cause de la simplicité de son application et de la nette délimitation des zones de mise en défens. Néanmoins,

la typologie spatiale des peuplements qui est généralement en parquets, implique une différenciation des interventions et actions qui en découleraient, au vu de l'occupation de l'espace. Attendu que l'unité élémentaire de gestion technique est la parcelle, le mode de mise en valeur par l'aménagement adoptera des assiettes d'interventions simultanées par parcelles entières. Tout au plus, les parcelles sont regroupées en suites de régénération, d'amélioration et/ou de reconstitution, selon leurs occupations dominantes. La durée de l'application de l'aménagement est généralement fixée à 20 ans, le quartier de régénération couvrirait en moyenne le 1/5 de la contenance totale de la série à aménager.

6. Conclusion

La faible valeur économique et la qualité physico-technologique médiocre des produits du pin d'Alep n'ont pas favorisé une sylviculture plus ambitieuse. Plusieurs auteurs (Sghaier et Ammari, 2012 ; Garchi *et al.*, 2001) accordent au pin d'Alep en Tunisie un rôle plutôt de protection de l'environnement beaucoup plus important que celui de la production ligneuse. Cependant, devant la demande en graines pour un usage essentiellement culinaire qui ne cesse d'augmenter d'une année à une autre, la production des graines devient un objectif de production très intéressant et un créneau fort prometteur pour cette espèce. Les graines utilisées pour la préparation d'une crème typique connue en Tunisie sous le nom de «assida zgougou» sont commercialisées à travers tout le pays à l'occasion de la fête du Moulded. Elles ont également de nombreuses autres vertus médicinales et cosmétiques, de grande valeur ajoutée. Une sylviculture orientée vers la production commerciale des graines ne pourrait que valoriser davantage cette espèce et mieux la conserver.

Références bibliographiques

- Alaoui A., Laaribya S., Gmira N., 2011 - Production, croissance et modèles de conduite sylvicoles des principales essences (le pin maritime et le pin d'Alep) de reboisement au Maroc. *Journal of Forestry*. **11** (1): 68 – 84
- Aussenac G., 1987 - Effets de l'éclaircie sur l'écophysiole des peuplements forestiers. *Schweiz. Z. Forstwes* 138 : 685-700.
- Bedel J., 1986 - Aménagement et gestion des peuplements de pin d'Alep dans la zone méditerranéenne française. *Options Méditerranéennes*. Série Etude CIHEAM 86/1, 127-156.
- Belghazi B., 1998 - Eclaircies dans les plantations de pins. Thème 4. Rapport de mission. Deuxième projet de développement forestier. 21 p + annexes.
- Belghazi, B. Ezzahiri, M. Romane, F. 2000 - Productivité de peuplements naturels de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans la forêt de Tamga (Haut Atlas, Maroc). *Cahiers Agricultures*, **9** (1), 39-46.
- Bentouati A., 2006 - *Croissance, productivité et aménagement des forêts de pin d'Alep (Pinus halepensis M.) du massif de Ouled Yagoub (Khenchela-Aurès)*. Doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques de l' Université El Hadj Lakhdar-Batna. 116 p.
- Boudy P., 1950 - *Economie forestière nord-africaine. Monographie et traitement des essences forestière*. Tome 2. Fasci 2, 529-878. Ed. La rose. Paris.
- Breda N., Granier A., Aussenac G., 1995 - Effects of thinning on soil water balance and tree water relations, transpiration and growth in oak forest (*Quercus petraea* (Matt) Liebl.). *Tree Physiol*. 15: 295-306.
- Brochiero F., Chandioix O., Ripert C., Vennetier M., 1999 - Autécologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire. *Forêt méditerranéenne*, XX (2), 83-94.
- Chakroun M.L., 1986 - Le pin d'Alep en Tunisie. *Options Méditerranéennes*. Série Etude CIHEAM 86/1, 25-27.
- Clutter J.L., Fortson J.C., Pienaar L.V., Brister G.H., Bailey R.L., 1983 - *Timber management: A quantitative approach*. John Wiley and Sons, New York, 333 p.
- Couhert B., Duplat P., 1993 - Le pin d'Alep. Rencontres forestiers-chercheurs en forêt méditerranéenne. La Grande-Motte (34), 6-7 octobre 1993. Éd. INRA, Paris, (les colloques no : 63) : 125-147.
- Davis L.S., Johnson K.N., 1987 - *Forest management* (3rd ed.). McGraw-Hill, New York, 790 p.
- Davis L.S., Johnson K.N., Bettinger P.S., Howard T.E., 2001 - *Forest management: To sustain ecological, economic and social values* (4th ed.). Mc Graw Hill, New York, 804 p.
- Direction Générale des Forêts, 2010 - Inventaire des forêts par télédétection. Résultats du deuxième inventaire forestier et pastoral national.
- Donner B.L., Running S.W., 1986 - Water stress response after thinning *Pinus contorta* in Montana. *For. Sci.* **32** : 614-625.
- Ducrey M., Huc R., 1999 - Effets de l'éclaircie sur la croissance et le fonctionnement éco-physiologique d'un taillis de chêne vert. *Rev. For. Fra*. LI. **2** : 326-340.
- Frantz F., Forster H., 1979 - *Table de production de pin d'Alep pour les Aurès (Algérie)*. Chaire de la production forestière de l'Université de Munich, 114 p.
- Garchi S., Ammari Y., Sghaier T., Khaldi A., 2001 - Étude du comportement du pin d'Alep en Tunisie. *Annales de l'INRGREF*, no spécial : 147-162.
- Garchi S., 1991 - *Approche multidimensionnelle de la typologie et de la cartographie des stations à pin d'Alep de la région de Touiref (Tunisie Septentrionale)*. Thèse doctorat. Université Catholique de Louvain. Faculté des Sciences Agronomique. 219 + annexes.

- Garchi S., Ben Mansoura A., 1999 - Influence de l'ombrage sur la structure et l'accroissement du pin d'Alep à Jbel Mansour. *Annales de l'INRGREF*. (3), 89-102.
- Jalel T., 1996 - Histoire des reboisements en Tunisie. Communication au séminaire de Sousse sur les reboisements en Tunisie. 25 au 26 Septembre.
- Jiménez E., Vega J.A., Pérez-Gorostiaga P., Cuiñas P., Fonturbel T., Fernandez C., Madrigal J., Hernando C., Gijarro M., 2008 - Effects of precommercial thinning on transpiration in young post-fire maritime pine stands. *Forestry* 81(4): 543-557.
- Khouja M.L., Khaldi A., Mokhtar A., 1999 - Effet de l'élagage sur la croissance en hauteur d'une jeune plantation de pin d'Alep. *Annales de l'INRGREF*. (3), 13-20.
- Ladurner P., 1997 - Eclaircies dans les plantations de pin. Thème 3. Rapport de mission. Deuxième projet de développement forestier. 15 p + annexes.
- M.A.R.H.P.T. Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche de Tunisie. DGACTA, 2015 - Formulation du Programme de Gestion des Ressources Naturelles dans les Territoires Ruraux Vulnérables de Tunisie. Document de travail : fiche filière graines de pin d'Alep El Ksour, Ain Fdhil, El Ksour (Le Kef). 30p.
- Misson L., Nicault A., Guiot J., 2003 - Effects of different thinning intensities on drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *For. Ecol. Manage.* **183** : 47-60.
- Montero G., Canellas I., Ruis-Peinado R., 2001 - Growth and Yield models for *Pinus halepensis* Mill. Invest. Agr. Sist. Recur. For., **10** (1), 24 p.
- Orazio C., 1986 - Sylviculture du pin d'Alep. Options Méditerranéennes. Série Etude CIHEAM 86/1, 47-54.
- Rondeux J., 1993 - *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Les presses agronomiques de Gembloux, 521 p.
- Schütz J.P., 1990 - *Sylviculture 1 : Principes d'éducation des forêts*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 243 p.
- Sghaier T., Ammari Y., Garchi S., Khaldi A., 2001 - Croissance en hauteur et classes de fertilité du pin d'Alep. *Annales de l'INRGREF*. Num. Spécial, 45-53.
- Sghaier T., Garchi S., 2009 - Modélisation de la croissance en hauteur dominante et fertilité des peuplements de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Ecologia Mediterranea*, **35** : 49-63.
- Sghaier T., Ammari Y., Garchi S., 2008 - Étude et choix d'équations de cubage d'arbres pour le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Revue de l'INAT*. **23**, 2 : 199-225.
- Sghaier T., Ammari Y., 2012 - Croissance et production du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Ecologia Mediterranea* - Vol. **38** (1). 39-57.
- Souleres G., 1969 - Le pin d'Alep en Tunisie : *Annales de l'Inst. Nat. Rech. Forest.* Tunisie. Vol **2**. Fasc.126 p.
- Souleres G., 1975 - Classes de fertilité et production des forêts tunisiennes de pin d'Alep. *Rev. For. Fr.*, XXVII (1), 41-49.
- Vennetier M., 2003 - La régénération du pin d'Alep après incendie. Info DFCI. Bulletin du Centre de documentation « *Forêt méditerranéenne* », n° 50. 8.
- Vennetier M., Ripert C., Brochiéro F., Rathgeber C.B.K., Chandiooux O., Estève R., 2010 - Evaluation de la croissance du pin d'Alep en région méditerranéenne française. *Revue Forestière Française*, n° 5.
- Wilson F., 1979 - Numerical expression of stoking in terms of height. *J. For.* **44**, 10: 758-761.

CHAPITRE 10

La santé du pin d'Alep en Tunisie

Mohamed Lahbib Ben Jamâa¹, Manel Mejri¹, Samir Dhahri¹, Olfa Ezzine,
Meriem Zouaoui¹, Samir Bel Haj Salah²

(1) Institut National de Recherches en Génie Rural Eaux et Forêts. Rue Hédi Karray,

(2) PB 10, 2080, Ariana.

Université de Carthage, Tunisie.

(3) Direction Générale des Forêts. Rue Alain Savary, Tunis. Tunisie.

Résumé. La majorité des travaux en rapport avec la santé des forêts de pin d'Alep ont été réalisés sur les insectes ravageurs de cette essence. Ces ravageurs ne représentent pas un facteur limitant pour cette espèce, mais ils peuvent périodiquement et localement affaiblir notablement les peuplements. Dans les pinèdes tunisiennes, nous avons observé des défoliateurs (lépidoptères, aphides et cochenilles), des xylophages (scolytes, Cérambycides et Buprestidés).

La processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) est l'un des ravageurs défoliateurs le plus redoutable du pin d'Alep en Tunisie. Elle affecte cycliquement les peuplements de pin, et peut lors de ses pullulations, provoquer des défoliations importantes des arbres de pin d'Alep, qui peuvent les affaiblir et les soumettre aux attaques des insectes secondaires comme les scolytes. Toutefois, la pérennité des peuplements n'est menacée que très rarement. L'insecte est observé dans presque toutes les pinèdes tunisiennes. En plus de la PP, la tordeuse des pousses du pin : *Rhyacionia buoliana* Schiff. a fait l'objet d'une surveillance durant les années 60. Neuf espèces de pucerons : *Cinara maritima*, *C. palaestinensis*, *C. maghrebica*, *C. pinea*, *Eulachnus agilis*, *E. nigricola*, *E. rileyi*, *Aulacorthum circumflex* et *Schizolachnus pineti* attaquent le pin d'Alep en Tunisie. Par ailleurs, le pin d'Alep est particulièrement infesté par deux espèces de cochenilles *Leucaspis pusilla* et *L. loewi*.

Les insectes xylophages, associés aux pins, comptent parmi les agresseurs forestiers les plus redoutables. Trente espèces xylophages vivant aux dépens du pin d'Alep ont été recensées dans toutes les pinèdes tunisiennes, allant du Nord à la limite Sud de l'aire de répartition naturelle du pin d'Alep. Douze espèces de scolytes ont été identifiées : *Tomicus destruens*, *Orthotomicus erosus*, *Pityogenes calcaratus*, *Hylurgus ligniperda*, *H. micklitzii*, *Crypturgus mediterraneus*, *C. numidicus*, *Hylastes linearis*, *Carphoborus bonnairei*, *C. pini* et *Cryphalus numidicus*. Cependant, *T. destruens*, *O. erosus* et *P. calcaratus* forment les principaux scolytes ravageurs du pin d'Alep. Dix espèces de Cérambycides ont été recensées : *Monochamus galloprovincialis*, *Arhopalus syriacus*, *A. rusticus*, *Criocephalus polonicus*, *Oxypleurus nodieri*, *Hylotrupes bajulus*, *Pogonocherus perroudi*, *P. neuhausi*, *P. caroli* et *Trichoferus griseus* et, dont les deux premières sont les plus étudiées. Six espèces de Buprestidés ont été trouvées : *Chrysobothris solieri*, *Melanophila cuspidata*, *Buprestis novemmaculata*, *B. octoguttata*, *Phaenops cyanea* et

Chalcophora mariana dont, les deux dernières sont les plus étudiées. Parmi ces insectes, les xylophages jouent un rôle considérable dans la transmission de plusieurs vecteurs pathogènes invasifs. Trois espèces de champignons, associées aux insectes xylophages ont été identifiées: *Leptographium wingfieldii*, *Ophiostoma minus* et *O. ips* associés avec *T. destruens* et seulement *O. ips* avec *Orthotomicus erosus*. Deux espèces de nématodes: *Bursaphelenchus tusciae* et *Cryptaphelenchus* sp. associées aux bois et aux insectes xylophages ont été identifiées.

Concernant les maladies de pin d'Alep, nous avons constaté : les maladies des jeunes plantations, la fonte des semis dans les pépinières forestières, le champignon du tronc (*Xanthochrous pini*) et le champignon des pousses (*Shaeropsis sapinea*).

Les insectes ravageurs et les champignons de pin méritent une attention particulière dans l'avenir pour avoir une idée sur le niveau d'infestation dans le but de contrôler leur comportement dans un contexte de changement climatique.

Mots clés : Pin d'Alep, insectes, maladies, pullulation, monitoring.

Abstract. The Aleppo pine health in Tunisia. The majority of studies were done on the pests of Aleppo pine. Those insects are not a limiting factor of Aleppo pine, but they can periodically and locally harm trees. In Tunisian pine forests, we have observed defoliators (Lepidoptera, aphids and cochineal), xylophagous (bark beetles, Cerambycidae and Buprestidae). On the other hand, very few works have been done on Aleppo pine diseases.

The pine processionary (PP) (*Thaumetopoea pityocampa*), is one of the most defoliating pests of Aleppo pine in Tunisia. It affects pine forests cyclically and can cause significant defoliation on Aleppo pine during their outbreaks that can weaken trees and subject them to attacks by secondary insects such as bark beetles. However, the sustainability of forests is rarely threatened. The insect is observed in all Tunisian pine forests and develops a single generation per year. In addition to PP, *Rhyacionia buoliana* Schiff was observed in the different pine forests of Aleppo in sixties. Nine species of aphids: *Cinara maritima*, *C. palaestinensis*, *C. maghrebica*, *C. pinea*, *Eulachnus agilis*, *E. nigricola*, *E. rileyi*, *Aulacorthum circumflex* and *Schizolachnus pineti* attack Aleppo pine in Tunisia. The Aleppo pine is particularly infested by *Leucaspis pusilla* and by *L. loewi*.

Xylophagous insects, associated with pines, are among the most harmful forest pests. Thirty xylophagous species living on Aleppo pine were recorded in Tunisia, from the north to the south. Twelve bark beetle species were identified: *Tomicus destruens*, *Orthotomicus erosus*, *Pityogenes calcaratus*, *Hylurgus ligniperda*, *H. micklitzii*, *Crypturgus mediterraneus*, *C. numidicus*, *Hylastes linearis*, *Carphoborus bonnairei*, *C. pini* and *Cryphalus numidicus*. However, *T. destruens*, *O. erosus* and *P. calcaratus* are the most important pests of Aleppo pine. Ten Cerambycidae species were recorded: *Monochamus galloprovincialis*, *Arhopalus syriacus*, *A. rusticus*, *Criocephalus polonicus*, *Oxypleurus nodieri*, *Hylotrupes bajulus*, *Pogonocherus perroudi*, *P. neuhausi*, *P. caroli* and *Trichoferus griseus*. Among them, the first ones (*M. galloprovincialis* and *A. syriacus*) are the most studied. Six Buprestidae species were identified (*Chrysobothris solieri*, *Melanophila cuspidata*, *Buprestis novemmaculata*, *B. octoguttata*, *Phaenops cyanea* and *Chalcophora mariana*), the last ones (*P. cyanae* and *C. solieri*) are the most studied. The xylophagous insects play a considerable role in the transmission of the invasive

pathogens species. Three associated fungi to scolytidae and their galleries were identified: *Leptographium wingfieldii*, *Ophiostoma minus* and *O. ips* associated with *T. destruens* and *O. ips* is only with *O. erosus*. Two nematods species: *Bursaphelenchus tusciae* and *Cryptaphelenchus* sp. associated to the wood and the xylophagous insects were identified.

Regarding diseases of Aleppo pine, we found: young plantations diseases, seedling melting in forest nurseries, trunk fungus (*Xanthochrous pini*) and shoot fungus (*Shaeropsis sapinea*).

Pests deserve special attention in the future; we need to clarify our idea about outbreaks and to control their behavior in a climate change context.

Keywords: Aleppo pine, insects, diseases, outbreak, monitoring.

1. Les insectes ravageurs du pin d'Alep en Tunisie

Les insectes ravageurs du pin d'Alep ne représentent pas un facteur limitant pour cette espèce mais, ils peuvent périodiquement et localement affaiblir les peuplements.

1.1. Les insectes défoliateurs

La Processionnaire du pin : *Thaumetopoea pityocampa* Schiff.

La processionnaire du pin (PP) (*Thaumetopoea pityocampa*) est l'un des ravageurs les plus redoutables du pin d'Alep en Tunisie (Rive, 1966). Elle affecte cycliquement les peuplements de pin et peut lors de ses pullulations provoquer des défoliations importantes sur le pin d'Alep et sur d'autres espèces de pin mais, ces dégâts, qui entraînent une perte de production, ne menacent que très rarement la pérennité des peuplements (Démolin et Rive, 1968 ; Ben Jamâa et Jerraya, 1999).

Dans la partie qui suit, une synthèse sur la PP en Tunisie a été réalisée par Avtzis *et al.*, (2014), et, a porté sur la distribution de l'insecte, ses préférences d'attaque, sa biologie, l'effet du changement climatique (CC) sur la PP et l'effet des défoliations sur la plante-hôte.

• Aire de distribution et plantes-hôtes

La PP sévit dans tous les pays du bassin méditerranéen. Elle s'attaque à toutes les espèces de pin et de cèdre sans exception (Démolin et Rive, 1968). En Tunisie, l'insecte existe dans tous les massifs forestiers de pins du nord au sud. Le pin d'Alep et le pin des Canaries (Figure 1) sont beaucoup plus attaqués que le pin pignon, surtout quand ces trois espèces se trouvent ensemble (Rive, 1966).

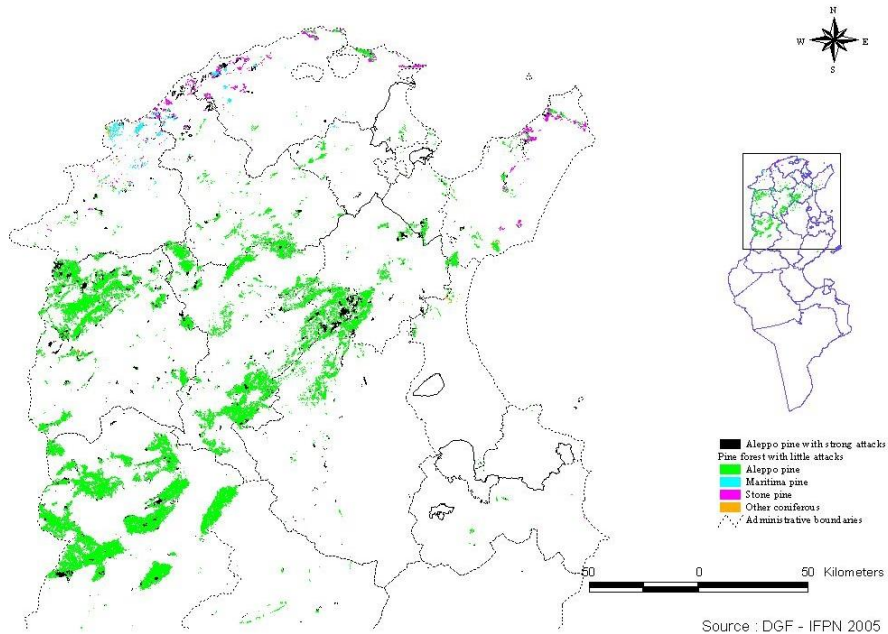


Figure 1. Aire de répartition géographique de la processionnaire du pin en relation avec les principales espèces de pin.

Les femelles de la processionnaire du pin ont tendance à se diriger, au moment de la procession de nymphose, vers les zones les plus éclairées et ensoleillées (Démolin, 1962) et à choisir les arbres qui se découpent en silhouette sur fond clair (Démolin, 1969a). En effet, les observations réalisées par Ben Jamâa *et al.* (2006) ont montré que les forêts de la région du Kef, caractérisée par des conditions édaphiques relativement mauvaises et des peuplements clairsemés à l'exception de quelques uns en bas de versant, sont très fortement infestées par rapport à celles de Kasserine (forêts denses).

La tolérance des provenances du pin d'Alep en Tunisie aux attaques de la processionnaire du pin a été comparée en comptant le nombre de nids d'hiver sur 30 provenances tunisiennes et exotiques (Khouja *et al.*, 1999). Ce travail a été mené entre 1993 et 1995 dans l'*Arboretum* de Korbous (10°35'E, 36°50'N, alt.180 m), créé en 1963 au nord-est de la Tunisie. Cette étude a démontré qu'à hauteur égale, les différentes provenances du pin d'Alep ont présenté en moyenne des taux d'attaque, par cet insecte, proches. Cela suggère que les différences significatives des taux d'attaque, observés au niveau des provenances ne sont pas dues à une résistance génétique propre aux provenances mais plutôt à la différence de la hauteur des arbres (Khouja *et al.*, 1999).

- **Cycle de vie**

D'après Démolin et Rive (1968) et Ben Jamâa (2014b), le cycle de la PP est généralement annuel en Tunisie (Figure 2), sauf pour les populations d'altitude, où un faible pourcentage d'individus a un cycle bisannuel (Jebel Chaambi et Jebel Salloum) dans la région de Kasserine.

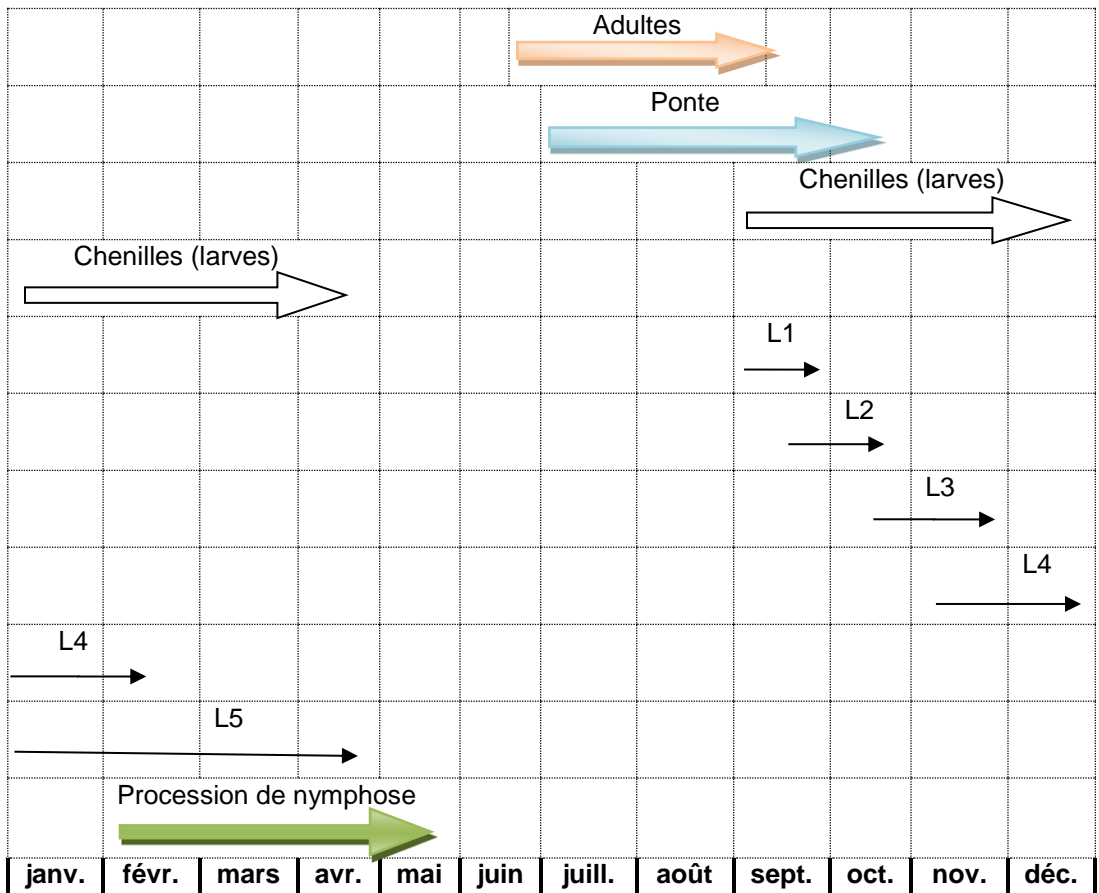


Figure 2 : Cycle biologique de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*).

Les dates d'émergence des adultes sont variables suivant l'altitude et la latitude. En Tunisie, quatre groupes ont été identifiés (Tableau 1).

Tableau 1. Variati.on de la moyenne des dates des émergences (Démolin et Rive, 1968).

Groupe 1 du 20/07 au 01/08	Groupe 2 du 01/08 au 15/08	Groupe 3 du 15/08 au 01/09	Groupe 4 du 25/08 au 05/09
Hiver frais		Hiver tempéré	Hiver doux
altitude élevée	altitude moyenne		
Jebel Chaambi	Jebel Chaambi	Mejez El Bab	Cap Blanc
Jebel Selloum	Jebel Selloum	Thibar	Cap Bon
Kessra	Oum Jeddour	Jebel Mansour	Zerniza
Makthar	Le Kef		

Les pontes sont immédiatement déposées après le vol des adultes. Elles apparaissent comme un petit manchon de 4 à 5cm de long, entourant deux ou plusieurs aiguilles de pin, recouvert d'écaillés de couleur beige clair. Une femelle pond en moyenne $128 \pm 51,3$ œufs. Le nombre moyen d'œufs par ponte, le plus élevé, a été observé dans la forêt de Mghila dans la région de Sidi Bouzid ($180 \pm 48,81$ œufs) et le plus faible dans les plantations du pin d'Alep d'El Menzeh dans la région de Tunis ($99 \pm 43,45$ œufs) (Ben Jamâa *et al.*, 2017).

L'éclosion des chenilles a lieu après 30 à 35 jours d'incubation. La jeune colonie attaque les feuilles du pin aux alentours immédiats de la ponte, puis se déplace régulièrement, lorsque toutes les aiguilles sont dévorées. Des légers tissages ou pré-nids sont confectionnés et abandonnés à chaque déplacement. En novembre, les chenilles tissent un nid définitif, généralement à l'extrémité de la branche ou à la flèche de l'arbre. Elles l'abandonnent pendant la nuit pour aller manger, y reviennent le matin et y restent groupées toute la journée. Les chenilles passent par cinq stades larvaires, avec une durée variable suivant la rigueur de l'hiver, surtout pour les deux derniers stades larvaires (Tableau 2).

Tableau 2. Durée approximative de développement de chaque stade larvaire (Démolin et Rive, 1968).

Etat des colonies	Stade larvaire	Durée approximative de chaque stade larvaire		
Pré-nids Déplacements réguliers des colonies	L1	12 jours		
	L2	14 jours		
	L3	30 jours		
Nids d'hiver Emplacement définitif		Hiver doux	Hiv. tempéré	Hiver frais
	L4	30 jours	60 jours	90 jours
	L5	30 jours	60 jours	90 jours

La procession de nymphose précède l'enfouissement généralisé de la colonie. Elle a lieu à la fin du 5^{ème} stade larvaire, de la fin du mois de janvier jusqu'au mois de mars, selon la rigueur de l'hiver. Après l'enfouissement de la colonie, les chenilles tissent un cocon individuel à quelques centimètres sous terre (5 à 20 cm), puis se transforment en chrysalides (la nymphose). La chrysalide reste en arrêt de développement ou diapause^{2*} jusqu'à un mois avant le vol des papillons.

• **Facteurs de mortalité de la PP au stade œuf**

La mortalité au stade œuf peut être due à plusieurs facteurs (Azizi, 2015) : œuf sec (un embryon mort), œuf avorté (œuf à chenille non éclore), œuf stérile (non fécondé) ou œuf parasité (émergence d'un parasite). Les œufs de la PP sont attaqués par deux parasitoïdes : *Ooencyrtus pityocampae* et *Baryscapus servadeii* (Battisti, 1989). Une étude réalisée par Azizi (2015), a démontré que *B. servadeii* apparait plus abondant (80%) qu'*O. pityocampa* dans les différentes forêts prospectées (Mghlia, Châambi, Gafsa, Bir Lahfay, Testour, Cité Tahrir, Menzeh).

• **Facteurs de mortalité de la PP au stade œuf**

La mortalité au stade œuf peut être due à plusieurs facteurs (Azizi, 2015) : œuf sec (un embryon mort), œuf avorté (œuf à chenille non éclore), œuf stérile (non fécondé) ou œuf parasité (émergence d'un parasite). Les œufs de la PP sont attaqués par deux parasitoïdes : *Ooencyrtus pityocampae* et *Baryscapus servadeii* (Battisti, 1989). Une étude réalisée par Azizi (2015), a démontré que *B. servadeii* apparait plus abondant (80%) qu'*O. pityocampa* dans les différentes forêts prospectées (Mghlia, Châambi, Gafsa, Bir Lahfay, Testour, Cité Tahrir, Menzeh).

• **Effet des défoliations**

La PP est un défoliateur, dont les chenilles se nourrissent des aiguilles de pin. Les attaques débutent dès l'automne mais, c'est dans le courant et à la fin de l'hiver qu'elles sont les plus importantes. L'essai réalisé à l'*arboretum* de

² période nécessaire au développement de l'adulte

Mejez El Bab, en décembre 1965, sur des arbres du pin d'Alep, âgés de 5 ans infestés chaque année par la PP par rapport à des arbres indemnes d'attaque a montré que l'arbre défolié, régulièrement, subit une perte considérable de croissance en hauteur (de 30 à 40%) et en diamètre (de 12 à 65%), si on considère deux saisons successives de végétation (Rive, 1967). Pour les forêts les plus âgées, il est possible que le problème se pose avec moins d'intensité, par suite de la résistance beaucoup plus grande des arbres attaqués (Démolin et Rive, 1968).

• *Effet du climat*

Les populations de la PP ne peuvent supporter longtemps des températures supérieures à 25°C sans subir par la suite un affaiblissement physiologique et cela d'autant plus que l'humidité est élevée. L'optimum vital correspondrait à une température mensuelle moyenne comprise entre 18 et 20 °C. L'effet de masse, le nid, puis les mouvements des chenilles compensent ou rétablissent les variations autour de cette moyenne (Démolin et Rive, 1968). En Tunisie, si le froid n'est pas à craindre, il n'en est plus de même pour les températures maximales. Les chenilles sont de ce fait hivernales par adaptation du cycle. Ces particularités climatiques expliquent les variations constatées dans les dates d'émergence et dans celles des différents cycles. Au Sud, où la température est élevée, le soleil n'a aucun effet sur la PP et en hiver les nids sont bien architecturés. Le développement larvaire doit avoir lieu après l'été pour échapper aux températures élevées, supérieures à 25°C. De ce fait, l'émergence des adultes et la fin de la période d'incubation se font au début du mois de septembre (Démolin, 1969b).

La distribution de la PP est influencée par différents paramètres climatiques notamment les températures de l'hiver et de l'été et la durée annuelle d'insolation (Huchon et Démolin, 1970). Concernant la distribution Nord (Europe) de cet insecte, plusieurs études ont montré qu'une augmentation des températures hivernales entraînent une augmentation de la survie des larves (en période hivernale), également d'étendre son aire de répartition en altitude et en latitude

en colonisant peu à peu les zones périurbaines et urbaines, qui reflètent actuellement une nouvelle menace sanitaire (Battisti *et al.*, 2005). Toutefois, l'augmentation des températures ne se limite pas à une augmentation des températures minimales, mais aussi à une élévation des températures maximales. La canicule enregistrée en 2003 par Battisti *et al.* (2006) dans le bassin parisien et sur les Alpes italiennes est un exemple probant, illustrant l'effet de cette augmentation sur la survie de la processionnaire. Cette canicule a provoqué deux effets contrastés : dans les Alpes italiennes, les colonies ont progressé dix fois plus vite en altitude durant l'hiver suivant grâce à l'augmentation de l'activité du vol des femelles. En revanche, dans le bassin parisien, une chute du niveau de population, vraisemblablement, due à une surmortalité des jeunes larves exposées à ces fortes températures (Robinet *et al.*, 2013).

L'élévation continue des températures pourrait donc engendrer des modifications de l'aire de distribution de la PP au niveau de sa limite sud (Nord d'Afrique). En effet, la distribution sud n'est pas encore cartographiée contrairement à celle du nord cartographiée durant les années 2011-2012 (Tamburini *et al.*, 2013).

• **Méthodes de lutte**

Plusieurs méthodes de lutte (mécanique, chimique, biologique et à base de phéromones) ont été utilisées contre la processionnaire du pin. Elles présentent, néanmoins, beaucoup d'inconvénients et sont difficiles à appliquer. L'échenillage manuel, consistant à couper les nids d'hiver et les détruire par incinération, est le seul moyen de lutte utilisé actuellement en Tunisie. Cette technique peut être appliquée essentiellement dans les jeunes reboisements et, lorsque le niveau d'infestation est faible. Elle peut être appliquée, également, dans les zones touristiques et dans les parcs de récréation. Si cette méthode présente l'avantage de préserver l'environnement et de créer de l'emploi, surtout pour les usagers de la forêt, elle présente, toutefois, beaucoup d'inconvénients. En plus des difficultés de mise en œuvre surtout en plantations adultes, s'ajoutent les

dangers d'urtications des ouvriers (Ben Jamâa et Jerraya, 1999). Les opérations d'échenillage manuel semblent être plus efficaces lorsqu'elles sont appliquées à des parcelles faiblement infestées et ne semblent pas souvent améliorer l'état de santé des parcelles fortement infestées (Ben Jamâa *et al.*, 2006). L'échenillage doit se dérouler avant que les chenilles atteignent le 4^{ème} stade larvaire (soies urticantes à partir de 3^{ème} stade). La période recommandée est novembre/décembre (Ben Jamâa *et al.*, 2006).

Par ailleurs, la lutte biologique, utilisant des produits à base de *Bacillus thuringiensis* (B.t) (action par ingestion) est la plus utilisée dans plusieurs pays du bassin méditerranéen. Elle a l'avantage d'être la moins polluante et de détruire les premiers stades larvaires de l'insecte, avant d'engendrer des défoliations, par les stades âgés (Ben Jamâa et Jerraya, 1999). Cette méthode s'est limitée en Tunisie au stade des essais. En effet, un premier essai de lutte contre la PP à l'aide de B.t. (Bactospeine 500UI) et des insecticides de contact (DDT, Naled, DDVP + Trichlorfon, Naled + Bromophos) a été effectué, manuellement, par Rive et Yana (1967), sur du pin d'Alep dans la région de Mejez El Bab. Un autre essai aérien, d'une préparation à base de *B. t. kurstaki* (Ecotech-Pro), a été réalisé en 1993, sur environ 28 ha de forêt du pin d'Alep dans la région de Kef (Alt. 650m ; âge 25-30 ; hauteur 3-4m), a entraîné une réduction des populations et de l'activité des chenilles à plus de 90%. Les parcelles traitées n'ont subi qu'une très faible défoliation, alors que les témoins ont perdu la totalité de leur feuillage (Ben Jamâa et Jerraya, 1999). Ainsi, ces produits à base de *Btk* peuvent être préconisés dans le cadre d'une lutte intégrée, faisant appel à des interventions manuelles (dans les jeunes plantations), des produits chimiques et des phéromones (dans les plantations urbaines et périurbaines) et des traitements à base de Bt sur des grandes échelles.

La tordeuse des pousses du pin : *Rhyacionia buoliana* Schiff.

La tordeuse des pousses du pin *Rhyacionia buoliana* (nom commun : Retiana) est observée dans les différentes forêts du pin d'Alep. Les larves âgées peuvent atteindre 15-22 mm, elles sont de couleur brun foncé. La chenille

hivernent dans les bourgeons terminaux du pin d'Alep, dans lesquels elle creuse une galerie centrale. Elle se nymphose courant mai. De la chrysalide brune, que l'on trouve alors dans la galerie, sort un papillon en juin qui (la femelle) pondra sur les bourgeons terminaux.

Les dégâts causés par les chenilles hivernantes se manifestent en mai : le bourgeon terminal, qu'il soit de la cime de l'arbre ou des branches latérales, avorte et se dessèche. Souvent, il faut refaire une flèche à partir d'une pousse latérale ou bien la pousse s'infléchit fortement puis se redresse (l'extrémité du rameau présente alors une incurvation en demi-cercle que l'on appelle 'baïonnette'). Quand la pousse est minée sur une grande partie de sa longueur, il n'est pas rare qu'elle se casse sous l'effet du vent.

Cette espèce a fait l'objet d'une surveillance par l'Institut de Reboisement de Tunisie depuis les années 60 (Badra, 1967), en recherchant systématiquement son existence dans les différents périmètres de reboisement bien qu'il n'ait pas signalé des graves dégâts. Toutefois, cette espèce mérite une attention particulière dans l'avenir pour avoir une idée sur son niveau d'infestation et contrôler son comportement dans un contexte de changement climatique.

1.2. Les Aphides (Pucerons) et les cochenilles

Diverses espèces de pucerons se nourrissent de la sève de nombreux arbres forestiers et leurs piqûres peuvent entraîner la malformation des fruits et le développement des galles chez certaines espèces. La plupart d'entre elles migrent des arbres vers les plantes herbacées. Plusieurs espèces, plus particulièrement du genre *Cinara* colonisent les forêts de pins en Tunisie. Sept espèces appartenant à la famille de Lachninae ont été identifiées (Ben Halima et Ben Jamâa, 2012). *Cinara maritima* Dufour, *C. palaestinensis* Hill Ris Lambers, *C. maghrebica* Mimeur, *C. pinea* Mordviko, *Eulachnus agilis* Kaltenbach et *E. nigricola* Pasek ont été observées sur le pin d'Alep au nord-ouest de la Tunisie. *Eulachnus rileyi* a été trouvée à Soliman (nord-est de la Tunisie) (Boukhris-Bouhachem *et al.*, 2012). Une seule espèce appartenant à la famille de

Aphidinae (*Aulacorthum circumflex* Buckton) a été trouvée (Ben Halima et Ben Jamâa, 2012). Deux espèces de pucerons de la famille de Lachnidae se rencontrent fréquemment sur le feuillage et sur les rameaux de pins. Les colonies du Puceron gris des aiguilles *Schizolachnus pineti* qui envahissent les jeunes arbres dès le mois de mai et jusqu'à septembre ; ils sont généralement disposés les uns à la suite des autres le long des aiguilles, qui jaunissent et tombent prématurément. Ils sont visités par des fourmis. Les femelles déposent les œufs en automne et y hivernent. Le gros Puceron du pin, *C. pinea* mesure 3 à 5 mm de long. Il colonise plutôt la base des aiguilles des pousses de l'année et, peut également se nourrir de l'écorce des jeunes branches et des rameaux. Les œufs sont déposés en file sur les aiguilles en automne où ils hivernent.

Les cochenilles (*Leucaspis* spp.) sont des insectes piqueurs suceurs, qui s'observent sur les aiguilles du pin d'Alep et sur d'autres espèces de pins (pin maritime). Leurs pullulations sont généralement observées en période sèche mais, leurs dégâts sont limités sur cette essence. Ces cochenilles, généralement, n'affectent pas la santé de l'arbre.

Quelque soit l'espèce de *Leucaspis* considérée, sa présence provoque des variations de la pigmentation des aiguilles allant de la coloration rouge, de la surface entourant le point de fixation de l'insecte, jusqu'à la décoloration totale de l'ensemble de l'aiguille, suivi par sa chute et, accompagnée, dans le cas de très fortes infestations, de la mort fréquente des rameaux et des jeunes branches. Ce phénomène se répercute immédiatement, soit sur les jeunes pins dont il entrave la croissance, soit sur les sujets de tout âge, en les rendant plus sensibles, par suite de l'affaiblissement général qu'il provoque, aux attaques de coléoptères xylophages, tels que les Scolytides. La cochenille blanche *Leucaspis pusilla* se rencontre dans la plupart des massifs forestiers, avec des degrés d'infestation généralement, faibles à très faibles, à l'exception de celui du Kef, où elle est forte (Benassy, 1970). Alors que l'espèce *Leucaspis loewi* est également présente, mais avec des degrés plus faibles. Les populations de ces cochenilles, généralement faibles, sont contrôlées par divers endophages tels que : *Prospaltella leucaspidi*, *P. intermedia* et *Azotus atomon* (Benassy, 1970).

1.3. Les insectes ravageurs des cônes et des graines

En octobre 2012, dans la plantation du pin d'Alep (Tessala-Khetmine, Bizerte) de 7 ha âgée de 1 à 10 ans (plantations réalisées sur plusieurs années), parmi 10 arbres prospectés, 6 arbres (60%) présentent des cônes attaqués. Sur 252 cônes examinés, 13 seulement (5%) présentent les symptômes d'attaque (*observ.perso*).

Un redoutable ravageur des cônes, *Leptoglossus occidentalis*, a été détecté dans plusieurs zones causant d'énormes dégâts (Mitchell 2000 ; Reid *et al.* 2009; Roversi *et al.* 2011). Cette espèce a été signélée pour la première fois en Tunisie par Ben Jamâa *et al.*, (2013) dans les forêts de pins au nord-ouest, à Dar Fatma (Ain Draham) et à Sidi Bader (Tabarka).

Les graines oléagineuses, comme celles du pin d'Alep, peuvent être infestées par des insectes au cours de leur stockage, en particulier au printemps lorsque les températures remontent. En octobre 2013, des graines du pin d'Alep, provenant des forêts de Foussana et Thala (Kasserine), ont été infestées par la Mite méditerranéenne de la farine (*Ephestia kuehniella*) et le *Tribolium roux* de la farine (Ben Jamâa *et al.*, 2013). Ces espèces sont deux insectes spécifiques aux denrées stockées, qui s'attaquent aux graines récoltées, ayant subi une mauvaise conservation. Les taux d'infestation sont très faibles, de l'ordre de 6% de graines endommagées.

1.4. Les insectes xylophages

1.4.1. Inventaire

Les insectes xylophages, associés aux pins, comptent parmi les agresseurs forestiers les plus redoutables. Plus que trente cinq (35) espèces xylophages, qui attaquent les 3 principales espèces de pin (pin d'Alep, pin pignon et pin maritime) ont été recensées en Tunisie dont trente espèces vivent aux dépens du pin d'Alep (Tab. 3).

A l'exception de *Sirex noctilio* qui est un Hyménoptère de la Famille des Siricidae, les 34 espèces restantes appartiennent à l'ordre des Coléoptères et sont réparties sur 3 familles : la famille des Curculionidae (la plus importante), la famille des Cerambycidae et la famille des Buprestidae. Ces espèces xylophages se rencontrent dans toutes les pinèdes, allant de l'extrême Nord (Rimmel, Bizerte) jusqu'à la limite Sud de l'aire de répartition naturelle du pin d'Alep (Semmama, Kasserine).

Tableau 3: Liste des différentes espèces d'insectes xylophages des pins, recensées en Tunisie.

Ordre	Famil.	Espèce	Plantes hôtes	Références
Hymenoptera	Siricidae	<i>Sirex noctilio</i> Fabricius, 1793	<i>P. halepensis</i> , <i>P. pinea</i> , <i>P. pinaster</i>	Mejri <i>et al.</i> , 2016b Spradbery et Kirk, 1978
Coleoptera	Buprestidae	<i>Buprestis novemmaculata</i> Linnaeus, 1758	<i>P. halepensis</i>	Théry, 1942 ; Curletti, 1981 ; Mejri, 2017
		<i>Buprestis octoguttata</i> Linnaeus, 1758		
		<i>Chalcophora mariana</i> Linnaeus, 1758		
		<i>Chrysobothris solieri</i> Gory & Laporte de Castelnau, 1841	<i>P. halepensis</i> , <i>P. pinea</i> , <i>P. pinaster</i>	
		<i>Melanophila cuspidata</i> Klug, 1829	<i>P. halepensis</i>	
		<i>Phoenops cyanae</i> Fabricius, 1775		
	Cerambycidae	<i>Arhopalus syriacus</i> Reitter, 1895	<i>P. halepensis</i> , <i>P. pinea</i> , <i>P. pinaster</i>	Villiers, 1946; Hellrigl, 1971 ; Sama, 1993 ; Mejri <i>et al.</i> , 2014 ; Mejri, 2017
		<i>Arhopalus rusticus</i> Linnaeus, 1758	<i>P. halepensis</i>	
		<i>Crioccephalus polonicus</i> Motschulsky 1845		
		<i>Hylotrupes bajulus</i> Linnaeus, 1758		
		<i>Monochamus galloprovincialis</i> Olivier, 1795		
		<i>Oxypleurus nodieri</i> Mulsant, 1839		
		<i>Pogonocherus perroudi</i> Mulsant, 1839		
		<i>Pogonocherus neuhausi</i> Muller, 1916		
<i>Pogonocherus caroli</i> Mulsant 1862				
<i>Trichoferus griseus</i> Fabricius, 1792				

Tableau 3 (suite): Liste des différentes espèces d'insectes xylophages des pins, recensées en Tunisie.

Ordre	Famil.	Espèce	Plantes hôtes	Références
Coleoptera	Curculionidae	<i>Brachytemnus porcatus</i> Germar, 1824	<i>P. halepensis</i> , <i>P. pinaster</i> <i>P. pinea</i> , <i>P. brutia</i> <i>P. canariensis</i>	Ben Jamâa <i>et al.</i> , 2000 ; Ben Jamâa, 2007 ; Lieutier <i>et al.</i> 2016 ; Mejri, 2017.
		<i>Carphoborus bonnairei</i> Brisout, 1884	<i>P. halepensis</i>	
		<i>Carphoborus pini</i> Eichhoff, 1881		
		<i>Crypturgus numidicus</i> Ferrari, 1867		
		<i>Cryphalus numidicus</i> Eichhoff, 1878		
		<i>Crypturgus mediterraneus</i> Eichhoff, 1869		
		<i>Hylastes ater</i> Paykull, 1800		
		<i>Hylastes linearis</i> Erichson, 1836		
		<i>Hylobius abietes</i> Linné, 1758		
		<i>Hylurgus miklitzii</i> Wachtl 1881		
		<i>Hylurgus ligniperda</i> Fabricius, 1792		
		<i>Magdalis frontalis</i> Gyllenhal, 1827		
		<i>Magdalis rufa</i> Germar, 1824		
		<i>Orthotomicus erosus</i> Wollaston, 1857		
		<i>Otiorhynchus</i> sp.		
		<i>Pissodes notatus</i> Fabricius, 1787		
		<i>Pityogenes calcaratus</i> Eichhoff, 1878		
		<i>Tomicus destruens</i> Wollaston, 1865		

1.4.2. Les principales espèces xylophages : répartition et biologie

1.4.2.1. Les Curculionidae (Scolytinae)

Douze espèces de scolytes, ravageurs des pins ont été identifiées, à savoir : *Carphoborus bonnairei*, *C. pini*, *Crypturgus numidicus*, *C. mediterraneus*, *Cryphalus numidicus*, *Hylastes linearis*, *Hylurgus ligniperda*, *H. miklitzii*, *Orthotomicus erosus*, *Pityogenes calcaratus*, *Tomicus destruens* (Chararas, 1972 ; Ben Jamâa *et al.*, 2000 ; Ben Jamâa *et al.*, 2004 ; Ben Jamâa, 2007 ; Lieutier *et al.*, 2016 ; Mejri, 2017). Les trois espèces, *T. destruens*, *O. erosus* et *P. calcaratus* forment les principaux scolytes ravageurs du pin d'Alep (Ben Jamâa *et al.*, 2000).

• ***Tomicus destruens***

Cet insecte est rencontré dans toutes les pinèdes tunisiennes mais, principalement dans le Nord sur pin maritime (Ben Jamâa *et al.*, 2000). C'est une espèce monovoltine. Le vol des adultes n'est observé que lorsque la température maximale journalière est supérieure ou égale à 10°C. En Tunisie, cette espèce forme deux périodes de vol et de ponte : une première en automne (octobre-novembre) et une deuxième au printemps (janvier-avril), en raison des différences climatiques entre les régions mais aussi de la ré-émergence des femelles qui vont former des générations sœurs (Ben Jamâa, 2000 ; Mejri, 2017).

• ***Orthotomicus erosus***

Cette espèce a une large répartition géographique en Tunisie. Elle se rencontre du Sud au Nord, sur toutes les espèces de pin et principalement sur le pin d'Alep. Elle présente une faible activité entre 14°C et 17°C, qui s'accélère ensuite à partir de 19°C (Chararas et M'sadda, 1970). Le vol des adultes commence en mai et se poursuit jusqu'au mois de novembre, avec un décalage entre les localités. *Orthotomicus erosus* a 3 générations principales par an (Mejri, 2017). Il colonise indifféremment les parties basales, médianes et apicales des arbres stressés du pin pignon et du pin maritime, contrairement au pin d'Alep, où les parties médianes et basales sont les plus attaquées (Ben Jamâa *et al.*, 2000 ; Mejri, 2017).

• ***Pityogenes calcaratus***

D'après Balachowsky (1949), *P. calcaratus* a été observé dans tous les peuplements purs du pin d'Alep du Kef, Zaghouan, Siliana et Kasserine mais, aussi, dans les peuplements mixtes où il a attaqué le pin d'Alep et le pin pignon (Nabeul, Bizerte et Ain Drahem) et sur pin maritime (Ben Jamâa *et al.*, 2000 ; Mejri, 2017). Le nombre de générations est variable. Le vol commence entre 14 à 16°C. Il se poursuit jusqu'au mois d'août, avec une ampleur en mai-juillet (Ben

Jamâa *et al.*, 2000 ; Ben Jamâa, 2007). *Pityogenes calcaratus* ne colonise que les petites branches et la canopée des arbres morts ou massivement attaqués par d'autres espèces tel que *O. erosus* (Mejri, 2017).

1.4.2.2. Les Cerambycidae

Dix espèces de Cérambycides ont été recensées en Tunisie : *Arhopalus syriacus*, *A. rusticus*, *Criocephalus polonicus*, *Hylotrupes bajulus*, *Monochamus galloprovincialis*, *Oxypleurus nodieri*, *Pogonocherus perroudi*, *P. neuhausi*, *P. caroli* et *Trichoferus griseus* (Villiers, 1946; Hellrigl, 1971 ; Sama, 1993 ; Mejri *et al.*, 2014 ; Mejri, 2017). Parmi ces espèces, *M. galloprovincialis* et *A. syriacus* sont les plus abondantes.

• *Monochamus galloprovincialis*

L'espèce a été signalée en Tunisie, pour la 1^{ère} fois, dans la pinède de Darnaya (Kef, nord-ouest de la Tunisie) par Villiers (1946). Actuellement, elle est largement distribuée dans nos pinèdes, est plus fréquente sur le pin d'Alep (86%), d'autant moins sur le pin maritime (11%) et rarement sur le pin pignon (3%) (Mejri *et al.*, 2014). La densité d'attaque moyenne de *M. galloprovincialis* est de loin plus élevée sur le pin d'Alep, où elle a atteint 44 galeries/m² de bois. Elle est, par contre, moins élevée sur les tronçons du pin maritime et ceux du pin pignon, avec respectivement 11 et 2 galeries/m² de bois. Ce qui montre que le pin d'Alep constitue l'hôte principal de *M. galloprovincialis* (Mejri, 2017). Ce xylophage attaque différemment les différentes parties des arbres des trois plantes hôtes. Les parties basales, médianes et apicales du pin pignon et du pin d'Alep ont été proportionnellement attaquées. Cependant, sur le pin maritime, la densité d'attaque de *M. galloprovincialis* a été plus élevée au niveau de la partie apicale et a dépassé 19 galeries/m² de bois contrairement à celle retrouvée au niveau de la base de l'arbre et qui n'a pas dépassé les 4 galeries/m² (Mejri, 2017). La densité d'attaque de *M. galloprovincialis* diffère entre les trois espèces de pin. Le pin d'Alep est de loin l'espèce la plus attaquée suivie par le pin

maritime et, par ailleurs l'attaque est très faible sur pin pignon (Mejri, 2017). *Monochamus galloprovincialis* a une seule génération par an (Mejri *et al.*, 2016). Le vol des adultes commence vers le mois de mai et s'étend jusqu'au mois d'août, atteignant son pic vers le mois de juin, avec quelques différences entre les régions. En Tunisie, le cycle de vie de cette espèce ressemble à celui observé en Italie (Francardi et Pennacchio, 1996 ; Rassati *et al.*, 2012), en France (Koutrompa, 2007), au Portugal (Naves *et al.*, 2008) et en Turquie (Akbulut *et al.*, 2008 ; Akbulut et Stamps, 2011).

• *Arhopalus syriacus*

Comparé au Maroc, où il a été observé sur pin d'Alep, pin maritime, pin des Canaries et pin radiata (Ghaioule et Haddan, 1994), en Tunisie, *A. syriacus* est plus abondant sur le pin pignon et sur le pin maritime que sur le pin d'Alep (Mejri, 2017). Il a une seule génération par an et, s'attaque, de préférence, aux parties inférieures du tronc du pin maritime de gros diamètres et à écorce épaisse. L'émergence des adultes commence fin avril ($T^{\circ}\text{moy} = 17,5^{\circ}\text{C}$) et atteint son pic vers le mois de juin ($T^{\circ}\text{moy} = 27,1^{\circ}\text{C}$). Les jeunes larves traversent l'écorce pour arriver au liber où elles continuent leur développement. La nymphose s'effectue de 6 à 10 cm dans la profondeur du bois (Mejri, 2017).

1.4.2.3. Les Buprestidae

Six espèces de Buprestidés ont été trouvées en Tunisie : *Chrysobothris solieri*, *Phaenops cyanae*, *Chalcophora mariana*, *Melanophila cuspidata*, *Buprestis novemmaculata* et *B. octoguttata* (Théry, 1942 ; Curletti, 1981 ; Mejri, 2017), dont les deux premières sont les plus abondantes.

• *Chrysobothris solieri*

C'est un ravageur secondaire des pins affaiblis, développe une seule génération par an. Les premiers adultes apparaissent vers mi-mai et les derniers

vers fin août, avec une ampleur d'émergence durant le mois de juillet (Théry, 1942 ; Carle, 1974). *Chrysobothris solieri* est plus fréquent sur le pin d'Alep et sur le pin pignon que sur le pin maritime et se développe plutôt sur les arbres à écorce fine et à faibles diamètres (Mejri, 2017). Au Maroc, Ghaioule et Haddan (1994) ont reporté que l'espèce proche *C. affinis*, attaquant le pin maritime et préfère les branches de faibles diamètres (3 à 5 cm).

- ***Phaenops cyanae***

L'insecte a été plus fréquemment observé dans les forêts du pin maritime d'Ain Drahem et de Béja et d'une façon moindre sur celles du pin d'Alep à Siliana et à Kasserine. D'après Nierhaus-Wunderwald et Forster (2000), cette espèce accompagne les scolytes des pins et préfère les pins des lisières, exposés au sud, sud-est ou sud-ouest. C'est aussi un ravageur redoutable du pin sylvestre dans les pays du centre ouest de l'Europe (Sowiska *et al.*, 2000), du peuplier et du Saule dans la péninsule ibérique (Evans *et al.*, 2004).

Cette espèce est monovoltine. Les premiers adultes émergent en fin avril-début mai ($T^{\circ}_{\text{moy}}=17,5$ à $20,6^{\circ}\text{C}$) et continuent jusqu'à fin août ($T^{\circ}_{\text{moy}}=29,7^{\circ}\text{C}$) et leur pic d'émergence est atteint en juin à $27,6^{\circ}\text{C}$. L'essaimage des adultes de *P. cyanae* s'effectue lorsque la température atteint 25°C et par un fort ensoleillement et, s'étale de mi-juin jusqu'à la fin août (Feytaud, 1950).

1.4.3. Impact économique des insectes xylophages

L'impact des insectes xylophages est perçu à long terme et il dépend de l'agressivité de l'espèce impliquée (Wermelinger *et al.*, 2008). Cette agressivité découle de leur faible spécificité botanique, de leur vaste répartition géographique, de leur endémie permanente, de leurs possibilités de déplacements et principalement de la diversité de leur stratégie d'attaque (Carle, 1974 ; Lieutier *et al.*, 2004).

Chez les scolytes, les symptômes visibles, successifs à une attaque, consistent en une formation d'orifices d'entrée circulaires de petite taille (<3mm)

à la surface du tronc ; une vermoulure rousse visible sur tronc et au pied de l'arbre, rejetée à l'extérieur lors du creusement des galeries ; des émissions fréquentes de résine, traduisant les réactions de la plante hôte ; une perte d'adhérence et un décollement de l'écorce, suite à une attaque massive. Entretemps, la couleur du houppier change progressivement jusqu'au dessèchement et mort de l'arbre. Les galeries et les trous de sortie des adultes seront visibles au niveau de l'écorce et de l'aubier (Chararas, 1962 ; Carle, 1974). La dynamique des populations des scolytes est caractérisée par de fortes fluctuations des effectifs : des phases de pullulations brutales et irrégulières, qui occasionnent des dégâts considérables dans les forêts, succèdent à des périodes d'endémie plus ou moins longues. Durant ces dernières périodes, les scolytes, en effectifs très réduits, passent souvent inaperçus et ne se manifestent que par les traces des galeries qu'ils laissent sur le tronc des arbres morts ou sur les bois abattus (Lévieux *et al.*, 1985 ; Abgrall, 1999 ; Nierhaus-Wunderwald et Forster, 2000). Les scolytes sont à l'origine des dégâts majeurs (Kerris et Guerroudj, 1991 ; Graf et Mzibri, 1994 ; Ben Jamâa *et al.*, 2000 ; Benhalima, 2006 ; Chakali, 2007) principalement sur pin d'Alep, pin maritime et pin radiata (Kerris et Guerroudj, 1991 ; Ben Jamâa *et al.*, 2000 ; Bentouati et Barriteau, 2006 ; Linaladettu *et al.*, 2008 ; Nichane *et al.*, 2014). En Tunisie, les scolytes sont responsables d'importants dégâts depuis les années 60, notamment sur l'ensemble des peuplements du pin d'Alep (Chararas, 1962). L'ampleur des dégâts était plus importante au cours des années 1980, 1990 et 2000 (Ben Jamâa *et al.*, 2000 ; Ben Jamâa *et al.*, 2003). Parmi les 12 espèces, *T. destruens*, *P. calcaratus* et *O. erosus* sont les plus redoutables alors, les autres sont secondaires et causent peu de dégâts (Ben Jamâa *et al.*, 2000). Les dégâts de *P. calcaratus* et *T. destruens* sont les plus prononcés dans les pinèdes tunisiennes. Ce dernier a provoqué des destructions massives de plusieurs peuplements de pin maritime à Tabarka et à Bizerte (Hamza et Chararas, 1981). Suite aux 4 années de sécheresse (1990-1994), de très nombreux arbres de pin d'Alep morts ont été observés dans toutes les forêts de Kasserine, en particulier dans la première et la deuxième série de la forêt Aïn Amara et au Parc National de Chaâmbi, dont *P. calcaratus* est à l'origine de ces dépérissements.

La majorité des Cerambycidae des pins sont des ravageurs secondaires. Ils sont saproxyliques et interviennent tardivement sur le bois ou sur les vieux chablis (INRA, 2000). Les larves se développent en général dans le bois mort, plus rarement dans le bois vivant, ouvrant la voie à d'autres organismes (autres insectes, champignons, bactéries, etc.), qui transformeront progressivement ce bois en humus. D'autres espèces se développent dans les tiges ligneuses de certaines plantes. Les Cerambycidae forent leurs galeries profondément dans le bois. *Monochamus galloprovincialis* préfère les branches et les portions du tronc à écorce lisse, tandis que *A. syriacus* préfère les portions du tronc à écorce moyennement épaisse (Carle, 1974 ; Mejri, 2017). En plus de ces dégâts, occasionnés sur le bois, ils peuvent être vecteurs d'autres organismes symbiotiques pathogènes tels que les champignons, les bactéries ou les nématodes (Carle, 1974 ; Wermelinger *et al.*, 2008), tel l'exemple de *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner, 1934 ; Nickle, 1970), agent causal de la maladie du dépérissement du pin. Les nématodes sont transmis d'une plante malade à une plante saine par le biais de son insecte vecteur *M. galloprovincialis* (Evans *et al.*, 1996). Dans le bois, les nématodes se nourrissent d'hyphes de champignons (*Ceratocystis* spp.) qui sont aussi transmis au bois par des coléoptères qui y pondent. L'arbre meurt 30 à 40 jours après l'infection et peut renfermer des millions de nématodes dans le tronc, dans les branches et dans les racines. Les fortes températures et la sécheresse favorisent le développement et la propagation des nématodes (Naves, 2007 ; Naves *et al.*, 2015 ; Koutrompa, 2007).

Par ailleurs, les pins peuvent être attaqués par une dizaine d'espèces de Buprestidae, dont principalement : *Buprestis octoguttata*, *Chrysobothris solieri*, *Anthaxia spulchralis*, qui s'attaquent aux jeunes pins récemment abattus, ainsi que *B. novemmaculata*, *P. cyanea*, *Melanophila acuminata* et *C. mariana* s'attaquent, plutôt, aux vieux arbres morts ou malades (Feytaud, 1950, Nierhaus-Wunderwald et Forster, 2000). *Phaenops cyanea* constitue un grand fléau, notamment pour les pins affaiblis et peut s'attaquer en cas de forte pullulation aux arbres plus résistants. Il s'installe et se développe sur les portions de faibles diamètres du tronc, à écorce crevassé (Feytaud, 1950 ; Carle, 1974).

1.4.4. Association insectes xylophages et micro-organismes

Les insectes xylophages jouent un rôle considérable dans la transmission de plusieurs vecteurs pathogènes invasifs (Liebhold *et al.*, 1995 ; Storer *et al.*, 1999).

- ***Scolytes / pin d'Alep / champignons phytopathogènes associés***

Plusieurs scolytes, comme *T. destruens*, *T. minor*, *I. sexdentatu* et *I. acuminatus* transmettent les champignons *Ophiostoma* spp. et *Leptographium* spp., responsables de la maladie du bleuissement aux arbres qu'ils colonisent et qui s'incrudent très profondément dans le bois de pins (Piou *et al.*, 1989 ; Nierhaus- Wunderwald et Forster, 2000 ; Ben Jamâa *et al.*, 2007).

Trois espèces de champignon, associées aux insectes attaquant le pin d'Alep et à leurs galeries ont été identifiées (Ben Jamâa, 2007) : *Leptographium wingfieldii* Morel et *Ophiostoma minus* (Hedgc.) H. et P. Syd. (associés avec *T. destruens*) et *Ophiostoma ips* (Rumb.) Nannf. (associé avec *T. destruens* et *O. erosus*).

Les travaux de Ben Jamâa *et al.* (2007) ont montré, en outre, qu'après inoculations isolées, *L. wingfieldii* est plus virulent sur le pin d'Alep que *O. minus*. Ceci pourrait, donc constituer un sérieux facteur d'affaiblissement pour les forêts du pin d'Alep en Tunisie. Il est probable qu'il pourra jouer un rôle dans les relations pin d'Alep/*T. destruens*, comme celui suggéré par Lieutier *et al.* (1989a) pour le pin sylvestre/scolytes.

Pour tester la pathogénie du champignon *L. wingfieldii*, des inoculations artificielles ont été réalisées sur des provenances du pin d'Alep dans les arboretums de Korbous et de Henchir Nâam (Ben Jamâa, 2007). Les paramètres suivis sont la longueur de la réaction induite et le pourcentage d'aubier endommagé (aubier non conducteur, bleuissement et dessèchement). L'impact de ce champignon semble être plus important dans l'arboretum de Korbous que dans celui de Henchir Nâam. La sensibilité des provenances à l'attaque du champignon à Korbous, semble s'expliquer par la faible croissance des arbres.

En effet, les provenances sont dans l'ensemble moins vigoureuses à Korbous qu'à Henchir Nâam où les conditions pédoclimatiques sont plus favorables au développement du pin d'Alep et qui se traduisent par une meilleure croissance en hauteur et en diamètre.

En ce qui concerne la résistance du pin d'Alep aux champignons phytopathogènes associés, Ben Jamâa (2007) a identifié 13 composés phénoliques pour le liber non inoculé et le liber inoculé du pin d'Alep (glucoside de l'acide p-coumarique, ester d'acide para-coumarique, P1, glycoside de l'acide ferulique, glucoside de l'acétphénone, glucoside de taxifoline, taxifoline, P2, P3, glucoside de quercétine, pinosylvine, monométhyléther de pinosylvine et la catéchine). Le Glucoside de quercétine semble être caractéristique du pin d'Alep. Le mécanisme phénolique de la réaction induite du liber du pin d'Alep après inoculations stérile ou de *L. wingfieldii* semble être une réponse à la blessure modulée par le champignon et se déroulant en deux phases. Après inoculation fongique, la concentration de pinosylvine et de son monométhyléther semble se stabiliser à partir du 14^{ème} jour à Henchir Nâam, alors qu'elle continue à augmenter jusqu'au 30^{ème} jour à Korbous. Les provenances de Henchir Nâam semblent être plus résistantes que celles de Korbous. En effet, *L. wingfieldii* a dégradé les deux composés à Henchir Nâam, alors qu'il est toujours présent à Korbous dans la zone du prélèvement et qu'il est capable de métaboliser ces composés.

Insectes xylophages / pins / nématodes

D'autres espèces de xylophages sont responsables de la transmission des nématodes à leur plantes hôtes. Diverses espèces de *Monochamus* transportent le nématode virulent, *B. xylophilus*, agent causal de la maladie du dépérissement du pin : *M. galloprovincialis* en Europe, *M. caroliensis* en Amérique du Nord et *M. alternatus* au Japon (Akbulut et Stamps, 2011).

En Tunisie, l'étude préliminaire de la nématofaune associée aux bois et aux insectes xylophages (*O. erosus*, *H. ligniperda*, *M. galloprovincialis*, *A. syriacus*, *P. perroudi* et *C. soleiri*) a permis d'identifier deux espèces de nématodes : *B.*

tusciae (Mejri *et al.*, 2016a) et *Cryptaphelenchus* sp. (Mejri, 2017). Les observations de Mejri (2017) sur les suspensions issues de 6 espèces de Cerambycidae (*O. erosus*, *H. ligniperda*, *M. galloprovincialis*, *A. syriacus*, *P. perroudi* et *C. soleiri*) ont montré qu'uniquement 16% des suspensions sont positives aux nématodes, provenant de *M. galloprovincialis* et de *O. erosus* et *H. ligniperda*. Ces trois espèces constituent, par conséquent, des vecteurs potentiels de nématodes en Tunisie, notamment les deux Scolytes (*O. erosus* et *H. ligniperda*) qui transportent plus de nématodes que *M. galloprovincialis* avec respectivement 7 nématodes pour la première et 5 nématodes pour la deuxième, comparé à 3 pour la troisième. Le nématode virulent *B. xylophilus*, agent causal de la maladie du dépérissement du pin, n'a pas été isolé, ni de *M. galloprovincialis*, ni du bois des trois espèces de pin.

2. Les maladies du pin d'Alep

Rares sont les travaux qui ont été réalisés sur les maladies des essences forestières en Tunisie et plus particulièrement sur le pin d'Alep. Un seul travail par Delatour (1969), complété par des observations éparées par Ben Jamâa et Laarif (2001).

2.1. Maladies des jeunes plantations

Delatour (1969) a montré que dans les plantations artificielles du pin d'Alep, les problèmes phytopathologiques se posent en termes sensiblement différents, comparés à ceux des forêts naturelles. Les principaux facteurs qui peuvent intervenir dans le dépérissement des jeunes plantations du pin d'Alep sont, généralement, liés aux techniques d'élevage en pépinière et à l'adaptation d'une essence donnée aux conditions du milieu. Des mortalités ont été observées chez de jeunes pins d'Alep (âgés de 2 à 3 ans après plantation) pendant l'été 1967. La cause primaire semble être un enracinement défectueux (racines enroulées dues à l'élevage en sachet ou en godet). Les observations ont

aussi montré que les dépérissements observés sur les pins sont de causes autres que cryptogamiques.

2.2. La fonte des semis dans les pépinières forestières

La fonte des semis a été mentionnée en Tunisie depuis les années 60 (Delatour, 1969). Par la suite, les champignons de fonte de semis ont été détectés de nouveau en 1993, dans la pépinière d'Oued el Ksab au Cap bon sur le pin d'Alep et aussi sur le pin pignon. Les analyses pathologiques de laboratoire réalisés par Ben Jamâa et Laarif (2001) ont montré la présence de *Fusarium* sp., *Pythium* sp. et *Rhizoctonia* sp. sur le pin d'Alep et seulement *Fusarium* sp. sur le pin pignon. La conservation du champignon parasite dans le sol se fait soit par l'intermédiaire du mycélium qui se développe activement dans les sols humides (cas de *Rhizoctonia* sp.) soit par l'intermédiaire des oospores (cas de *Pythium* sp. et de *Phytophthora* sp.). Les blessures sont aussi un point de pénétration pour l'agent pathogène (Lanier *et al.*, 1978). Les températures (24 à 28 °C) et l'humidité élevée sont aussi favorables au développement du mycélium au dessus du collet. Une attaque de la semence avant sa germination ou une attaque de la pointe de la radicule dès son apparition est appelé fonte de pré-émergence, tels les cas de Oued el Bir et Oued el Ksab (Ben Jamâa et Laarif, 2001).

3.4. Maladies des arbres âgés du pin d'Alep

- ***La maladie du tronc du pin : Xanthochrous pini***

Le polypode des pins, dont l'agent causal est *Xanthochrous pini* ou *Trametes pini* ou encore appelé la pourriture alvéolaire du bois des pins, est un champignon qui altère profondément le bois du cœur. C'est aussi un champignon qui rend le bois absolument inutilisable. *Xanthochrous pini* est facilement reconnaissable sur le tronc des pins par les fructifications en forme de carpophores, qui sont les réceptacles appliqués contre le tronc de l'arbre,

généralement en forme de consoles ou sabots de cheval ou encore appelés épaulettes. La dissémination du champignon est assurée par les spores ou basidiospores (Anonyme, 1941).

En Tunisie, ce champignon est couramment répandu dans les forêts du pin d'Alep et doit être considéré comme endémique. Il se distribue le long de la frontière algérienne et plus précisément dans les gouvernorats de Kasserine et du Kef (Delatour, 1969). Les observations sur le pin d'Alep ont montré que la pourriture due à *X. pini*, caractérisée par la présence d'épaulettes sur les troncs des arbres, est une maladie de vieillesse du pin d'Alep qui s'accroît en fonction des diamètres des arbres. Les blessures provoquées sur les troncs des arbres représente un critère principal facilitant l'installation du pathogène (Delatour, 1969). Les pertes occasionnées sur le bois d'œuvre, dues à la pourriture du bois, dépassent les 78%, ce qui le rend inutilisable.

- ***Maladie des pousses du pin : Sphaeropsis sapinea***

Des dépérissements ont été observés, en juillet 2016, dans les peuplements naturels du pin d'Alep de Kasserine qui s'étale sur environ 60ha (Jebel Lajred) et 40ha (Jebel Birano) et sur une centaine d'arbres (Loubira, Foussana). Les symptômes d'attaque sur des arbres dépéris, se caractérisent par la présence des aiguilles jaunâtres et brunâtres. Les branches attaquées sont parfois mortes (dépourvues de leurs aiguilles). Il est rare où les arbres sont complètement morts. Des observations sous loupe binoculaire, réalisées à l'INRGREF, sur des brindilles et des branches, ont montré la présence des pycnides et des chancres. Par ailleurs, le repiquage des pycnides et des morceaux de bois a montré la présence du champignon du genre *Alternaria*.

Références bibliographiques

- Abgrall J.F., 1999. Conséquences prévisibles des tempêtes sur les composantes biotiques des écosystèmes forestiers gestion de leur dynamique. Le Courrier de l'environnement de l'INRA : Forêts et tempête, 20: 65-90.
- Anonyme, 1941. La pourriture alvéolaire du bois des pins le polypore du pin. Ministère de L'Agriculture, Administration des Forêts, Chasse et Pêche. Commission d'études des

- ennemis des arbres, des bois abattus et des bois mis en œuvre. Bulletin N° 29 :125-132.
- Akbulut S. & Stamps W., 2011. Insect vectors of the pine wood nematode: A review of the biology and ecology of *Monochamus* species. Forest Pathology, 42: 1-11.
- Akbulut S., Keten A. & Yuksel B., 2008. Effect of log seasonality on reproductive potential of *Monochamus galloprovincialis* reared in scots pine logs under laboratory conditions. Phytoparasitica, 36 (2): 187-198.
- Avtzis D., Battisti A., Ben Jamaa M.L., Branco B., Chakali G., El Alaoui El Fels M., Hodar H., Mirchev P., Rousselet J., Sauvard D., Schopf A., Yart A. & Zamoum M., 2014. Natural history of the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa*. In Chapter 2: Natural history of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.): new insights in relation to climate change. "Processionary moths and climate change: an update", 400p.
- Azizi Z., 2015. Eclaircissement de la situation de la chenille processionnaire du pin dans le sud de sa répartition (le sud Tunisien). Mastère INAT : 66 p.
- Balachowsky A., 1949. Faune De France 50 : Coléoptères Scolytides. Editions Lechevalier, 320 p.
- Badra M., 1967. Instruction technique sur la tordeuse des pousses du pin (*Retinia buoliana* Schiff.): premières mesures à prendre. IRT-Instruction Technique N°6.p.
- Battisti A. 1989. Field studies on the behaviour of two egg parasitoids of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller). BioControl, 34(1):29-38
- Battisti A., Stastny M., Buffo E. & Larsson S., 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. Global Change Biology, 12: 662-671.
- Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A. & Larsson S., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. Ecological Applications, 15: 2084-2096.
- Ben Halima & Ben Jamâa M.L., 2012. *Pinus* aphid in different area of Tunisia: Identification. 3rd meeting of the 7-03-14 IUFRO group "Entomological Research in Mediterranean Forest Ecosystems" (MEDINSECT 3). Hammamet (Tunisia) May 8 to 11, 2012.
- Ben Jamâa M., A. Jerraya & F. Lieutier, 2000. Les scolytes ravageurs de pins en Tunisie. Annales de l'INRGRF, 4 (27): 27-39.
- Ben Jamâa M.L, Lieutier F., Yart A., Khouja M.L. & Jeraaya A., 2007. The virulence of phytopathogenic fungi associated with the bark beetles *Tomicus piniperda* and *Orthotomicus erosus* in Tunisia. Forest Pathology, 37: 51-63.
- Ben Jamâa M.L. & Jerray A., 1999. Essai de lutte contre la processionnaire du pin : *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lep., *Thaumetopoeidae*) à l'aide de *Bacillus thuringiensis* Kurstaki (ECOTECH-PRO). Annales de l'INRGRF, 3: 3-12.
- Ben Jamâa M.L. & Laârif A., 2001. Les insectes nuisibles et les maladies du peuplier en Tunisie. Annales de l'INRGRF, N° spécial : 195-211.
- Ben Jamâa M.L., Mejri M., Naves P. & Sousa E., 2013. Detection of *Leptoglossus occidentalis* Heidemann, 1910 (Heteroptera: Coreidae) in Tunisia. African Entomology, 21(1): 165–167.

- Ben Jamâa M.L., Dhahri S. & Ben Mlik Z. 2013. Rapport d'expertise sur les attaques observées sur les graines de pin d'Alep au service des graines de la Direction générale des Forêts. INRGREF-LGVRF, 8 p.
- Ben Jamâa M.L., 2007. Relations Scolytinae/Champignons/Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans quelques régions forestières de la Tunisie. Doctorat de l'Institut National Agronomique de Tunis, Tunisie: 157 p.
- Ben Jamâa M.L., 2014b. The pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa*, in Tunisia. In Chapter 3: Climate warming and past and present distribution of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.) in Europe, Asia Minor and North Africa. "Processionary moths and climate change: an update", 400p.
- Ben Jamaa M.L., Chaar H. Hmadi L. Sliti O. & Missaoui S., 2006. Caractérisation des infestations et des techniques de lutte contre la processionnaire du pin dans les pinèdes de Kasserine et du Kef (Tunisie). Annales de l'INRGREF, N° Spécial (9) Tome 2 : 91-108.
- Ben Jamâa M.L., Chaar H., Azizi Z. & Dhahri S., 2017. Geographic Area of the Pin Processionary Moth (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff, Lepidoptera) in the Southern Aleppo Pine Forests and Effect of the Climatic Change. IUFRO-2017 (125^{ème} Anniversaire de l'IUFRO, Freiburg, Allemagne: 18 au 22 sept. 2017.
- Ben Jamâa M.L., Jerraya A. & Lieutier F., 2004. Observations sur la biologie et l'écologie des Scolytes de pins en Tunisie. Annales de l'INRGREF 8 : 13-29.
- Ben Jamâa M.L., Yart A., Jerraya A. & Lieutier F., 2003. Impact des conditions climatiques sur la biologie et les pullulations des scolytes ravageurs des pins en Tunisie. Colloque du GREDUR. Rabat, Maroc : 5p.
- Benassy C., 1970. Note sur le problème *Leucaspis* en Tunisie. Rapport de mission (12 mai 1970) : 5 p.
- Benhalima S., 2006. Les insectes xylophages et leur rôle dans le dépérissement du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) dans le Haut et le Moyen Atlas (Maroc).
- Bentouati A. & M. Bariteau, 2006. Reflections on the dying off of Atlas Cedars in the Aurès region of Algeria. Forest Mediterranean. 4 (27): 317-322.
- Boukhris-Bouhachem S., Souissi R., Sellami H. & Hullé M., 2012. Diversité des espèces de pucerons et évolution des populations des espèces vectrices. Proceedings du 23^{ème} Forum International des Sciences biologiques et Biotechnologie, Hammamet, Tunisie, 21-24 mars.
- Carle P., 1974. Le dépérissement du pin mésogéen en provence. Rôle des insectes dans les modifications d'équilibre biologique des forêts envahies par *Matsucoccus feytaudi* Duc. (*Coccoidea*, *Margarodidae*). Annales des Sciences Forestières, 31 (1) : 1-26.
- Chakali G. 2007. L'Hylésine des Pins, *Tomicus destruens* Wollaston 1865 (Coleoptera-Scolytidae) en zone semi-aride (Algérie). Silva Lusitana, 13 (1): 113-124.
- Chararas C. & M'sadda K., 1970. Attraction chimique et attraction sexuelle chez *Orthotomicus erosus* Woll. (Coléoptère *Scolytidae*). Compte Rendu de l'Académie des Sciences Paris, t. 271, Série D : 1904-1907.
- Chararas C., 1962. Etude biologique des *Scolytidae* des conifères. Lechevalier, Paris, 556 p.
- Chararas C., 1972. Recherches bioécologiques relatives à certains insectes des forêts de Tunisie. Rapport de mission, INRF – Tunisie, 21p.

- Curletti G., 1981 - Dati faunistici, biologici e sistematici nuovi od interessanti su alcuni Buprestidi dell'Africa Nord-Occidentale. Rivista Piemontese St. Nat., Carmagnola, II: 219-225.
- Curletti G., 1981. Dati Faunistici, Biologici E Sistematici Nuovi Od Interessanti Su *galloprovincialis galloprovincialis* (Olivier) in Toscana e in Liguria (Coleoptera: Cerambycidae). Redia, LXXIX: 153-169.
- Delatour C., 1969. Quelques observations de phytopathologie forestière faites en Tunisie. IRT Variétés Scientifiques, n° 2 : 11p.
- Démolin G., 1962. Comportement des chenilles de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. C.R. Ac. Sci., Paris, 258 : 706-707.
- Démolin G., 1969a. Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Dispersion spatiale, importance écologique. Annales des Sciences Forestières 26, 81-102.
- Démolin G., 1969b. Bioécologie de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff.: incidences des facteurs climatiques. Boletín del Servicio de Plagas Forestales, An XII. N°23 : 14 pages.
- Démolin, G. et Rive, J.L., 1968. La Processionnaire du pin en Tunisie. Ann. de I.N.R.F. Tunisie 1968, Vol.1 Fasc.1, 19p.
- Evans H., Mcnamara D.G., Braasch H., Chadoeuf J. & Magnusson C., 1996. Pest risk analysis (PRA) for the territories of the European Union (as PRA area) on *Bursaphelenchus xylophilus* and its vectors in the genus *Monochamus*. EPPO Bulletin, 26: 199-249.
- Evans H.F., Moraal L.G. & Pajares J.A., 2004. Biology, ecology and economics exotic forest pests: A threat to forest ecosystems. Forest Sciences Monographs, 30: 1-58. In: Lieutier F., Day K. R., Battisti A., Gregoire J. C. & Evans H. F. (Eds.): Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis. Dordrecht: Springer, pp. 447-474.
- Feytaud J., 1950. Les coléoptères du pin maritime. Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF. eds.), Nancy, France: 96p.
- Francardi V. & Pennacchio F., 1996. Note sulla bioecologia di *Monochamus galloprovincialis* Cerambycidae) und ihre bedeutung fur die forstund holzwirtschaft. Redia LII: 367-509.
- Ghaïoule D. & M. Haddan, 1994. Les ravageurs xylophages des pins, p. 47- 51. In: El Hassani A., Graf P., Hamdaoui M., Harrachi K., Messaoudi J., Mzirbi M. et Stiki A. (eds). Les ravageurs et maladies des forêts au Maroc: guide pratique pour la protection phytosanitaire des forêts. DPVCTRF éditions, Rabat.
- Graf P. & Mzirbi M., 1994. Les Scolytes des pins : 33-47. In :Ravageurs et maladies des forêts au Maroc. DPVCTRF, Rabat : 203p.
- Hamza H. & Chararas C., 1981. Etude de l'attraction primaire et de la nutrition chez *Blastophagus piniperda* L. Annales de l'INRF, Vol. 6, Fsc. 3, pp. 1-30.
- Hellrigl K., 1971. Die bionomie der europäischen *Monochamus*-Arten (Coleopt., Cerambycidae) und ihre bedeutung fur die forstund holzwirtschaft. Redia 52: 367-509.
- Huchon H. & Démolin G., 1970. La Bioécologie de la processionnaire du Pin. Dispersion potentielle. Dispersion actuelle. Revue forestière française, vol. XXII, n° spécial «La lutte biologique en forêt» : 220-234.

- Institut de Reboisement de Tunis (IRT), 1971. Relations entre la pression osmotique des Eucalyptus et leur adaptation en Tunisie. FO. SF/TUN 11. Rapport Technique 6. I.N.R.F Tunisie.
- Institut National de Recherches Agronomiques (INRA), 2000. Les insectes xylophages: Note technique. Forêts et tempêtes n°2(1) : 112-120.
- Kerris T. & Guerroudj A., 1991. Note Technique sur le Dépérissements des pinèdes: Diagnostic et méthodes de luttés. Rapport technique de l'Institut National des Recherches Forestières, Alger: 3 p.
- Khouja M.L., Sghaier T. & Ben Jamâa M.L., 1999. Effet de la hauteur des arbres sur le comportement des provenances de pin d'Alep vis-à-vis des attaques de la processionnaire. Annales de l'INRGREF 3: 21-31.
- Koutrompa F., 2007. Bioécologie et Phytogéographie de *Monochamus* (Coleoptera: Cerambycidae) vecteur du nématode du pin en Europe. Doctorat de l'Université D'Orléans, France: 187 p.
- Lanier L., Joly P., Bondoux P. & Bellemere A., 1978. Mycologie et pathologie forestière Tome I. Mycologie forestière. Masson, Paris, 487 p.
- Lévieux J., Lieutier F. & Delplanque A., 1985. Les Scolytes ravageurs du pin sylvestre. R.F.F. XXXVII, 6 : 431-440.
- Liebholt A.M., Macdonald W.L., Bergdahl D. & Mastro V.C., 1995. Invasion by Exotic Forest Pests: A Threat to Forest Ecosystems. Forest Science, 30:1-58 .
- Lieutier F., Day K., Battisti A., Gregoire J.C. & Evans H., 2004. Bark and wood boring insect in living trees in Europe, a synthesis. Kluwer Academic Publishers, London: 569p.
- Lieutier F., Yart A., Garcia J., Morelet M. & Lévieux J., 1989a. Champignons phytopathogènes associés à *Ips sexdentatus* Boern et *Tomicus piniperda* L. (Coleoptera : Scolytidae) et étude préliminaire de leur agressivité pour le pin sylvestre. Annales des Sciences Forestières, 46 (3) : 201-216.
- Lieutier F., Mendel Z. & Faccoli M., 2016. Bark Beetles of Mediterranean Conifers, p. 105-197. In : Paine T.D. and Lieutier F. (eds). Insects and Diseases of Mediterranean Forest. Springer International Publishing, Switzerland.
- Linaldeddu B. T., Hasnaoui F. & Franceschini A., 2008. First report of shoot blight and dieback caused by *Diplodia pinea* on *Pinus pinaster* and *P. radiata* trees in Tunisia. Phytopathol. Mediterr. 47: 258–261.
- Mejri M., 2017. Etude des insectes xylophages et des nématodes qu'ils véhiculent dans les pinèdes tunisiennes. Thèse de doctorat. Institut national agronomique de Tunisie, université de Carthage, Tunisie: 196 p
- Mejri M., de Sousa E., Naves P. & Ben Jamâa M.L., 2016. *Monochamus galloprovincialis* distribution in Aleppo pine forests in Tunisia. Turkish Journal of Forestry, 17 (Special Issue): 65-70.
- Mejri M., Fonseca L., Cardoso J. M. S., Ben Jamâa M. L. & Abrantes I., 2016a. *Bursaphelenchus tusciae* in Tunisia associated with *Hylurgus ligniperda*. Forest Pathology, 1–3.
- Mejri M., Naves P., de Sousa E. & Ben Jamâa M.L., 2016b. The European Wood Wasp *Sirex noctilio*: Distribution, Hosts and Parasitoids Recovered in Tunisia. Tunisian Journal of Plant Protection, 11(1) : 157-163.

- Mejri M., Naves P., de Sousa E. & Ben Jamaa M.L., 2014. Distribution and hosts of *Monochamus galloprovincialis* in Tunisia. *Tunisian Journal of Plant Protection*, 9 (2): 171-176.
- Mitchell P.L., 2000. Leaf-footed bugs (Coreidae). In: Schaefer, C.W. & Panizzi, A.R. (Eds) *Heteroptera of Economic Importance*. 337–403. CRC Press, Florida, U.S.A
- Naves P., 2007. Biology of *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera, Cerambycidae) and its role as vector of the pine wood nematode *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda, Parasitaphelenchidae) in Portugal. *Doutoramento em Biologia, Faculdade de Ciências*. 180 p.
- Naves P., Bonafacio L. & de Sousa E., 2015. Nematode-Vector. *In: De Sousa E., Vale F. & Abrantes I., Pine wilt disease in Europe, biological interactions and integrated management. Federação Nacional das Associações de Proprietários Florestais (FNAPF eds), pp.81-112*
- Naves P.M., de Sousa E. & J.M. Rodrigues, 2008. Biology of *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera: Cerambycidae) in the Pine Wilt Disease affected zone, Southern Portugal. *Silva Lusitana*, 16 (2): 133-148.
- Nichane M, Bourchikhi Z. & Khelil M.A., 2014. Les insectes xylophages et leur rôle dans le dépérissement du pin d'Alep dans les monts des Traras (Tlemcen, Algérie). *Lebanese Science Journal*, 15 (1): 19-26.
- Nickle W. R., 1970. A taxonomic review of the genera of the Aphelenchoidea (Fuchs 1937) Thorne 1949 (Nematoda: Tylenchida). *Journal of Nematology* 2 (1): 375-392.
- Nierhaus-Wunderwald D. & Forster B., 2000. Les insectes corticoles des pins. *Not. Prat.*, 31:1-12.
- Piou D., Lieutier F. & Yart A., 1989. Observations symptomatologiques et rôles possibles d'*Ophiostoma minus* (Ascomycète: Ophiostomales) et de *Tomicus piniperda* (Coleoptera: Scolytidae) dans le dépérissement du pin sylvestre en forêt d'Orléans. *Annals of Forest Science*, 46 : 39-53.
- Reid S., Cannon R., Malumphy C., Tilbury C. & Straw N. 2009. Western conifer seed bug *Leptoglossus occidentalis*. *Plant Pest Factsheet*, Food and Environment Research Agency, Sand Hutton, York, U.K.
- Roversi P.F., 2009. Adattamento di specie neo-introdotta. *Leptoglossus occidentalis* Heidemann. In: Jucker, C., Barbagallo, S., Roversi, P.F. & Colombo, M. (Eds) *Insettistica e tutela ambientale*. 224–229. *Arti Grafiche Maspero Fontana*, Cermenate, Italy
- Rassati D., Petrucco Toffolo E., Battisti A. & Faccoli M., 2012. Monitoring of the pine sawyer beetle *Monochamus galloprovincialis* by pheromone traps in Italy. *Phytoparasitica*, 40: 329-336.
- Rive, J.L. & Yana A., 1967. Essai de lutte contre la processionnaire du pin en Tunisie à l'aide de *Bacillus thuringiensis*. *Inst. Nat. Rech. Forest. Tunisie. Note Technique N°8*.
- Rive, J.L., 1966. La processionnaire du pin, notions de biologie et principes de lutte. *Note Technique N°5*, 8p.
- Rive, J.L., 1967. Premiers résultats de l'essai destiné à évaluer les conséquences des attaques des chenilles processionnaires sur la croissance des jeunes pins d'Alep. *Bull. d'Information de l'INRF. N°6-7*, pp 25-29.

- Robinet C., Rousselet J., Pineau P, Miard F. & Roques A., 2013. Are heat waves susceptible to mitigate the expansion of a species progressing with global warming? *Ecology and Evolution*, 3(9):2947-57.
- Sama G., 1993. Les Pogonocherus de l'Afrique du Nord et des îles atlantiques avec description d'une nouvelle espèce au Maroc. *Biocosme mesogéen*, 10 (2): 19-29.
- Sowiska A., A. Kolk and R. Wolski, 2000. Study results on new methods of forecastings and controlling *Phoenops cyanae* F. (Coleoptera: Buprestidae). *Sylwan J.* 144: 17-32.
- Spradbery J.P. & Kirk A.A., 1978. Aspects of the ecology of Siricid woodwasp (Hymenoptera: Siricidae) in Europe, North Africa and Turkey with special reference to the biological control of *Sirex noctilio* F. in Australia. *Bulletin of Entomological Research*, 68: 341–359.
- Steiner G. & Buhner E.M., 1934. *Aphelenchoides xylophilus* n. sp., a nematode associated with blue-stain and other fungi in timber. *J. Agric. Res.* 48: 949-951.
- Storer A.J., Wood D.L. & Gordon T.R., 1999. Modification of coevolved insect-plant interactions by an exotic plant pathogen. *Ecological Entomology*, 24: 238-243.
- Tamburini G., Marini L., Hellrigl K., Salvadori C. & Battisti A., 2013. Effects of climate and density-dependent factors on population dynamics of the pine processionary moth in the Southern Alps. *Climatic Change*, 121(4):701-712.
- Théry A., 1942. Faune de France, 41: Coléoptères Buprestides. Fédération française des sociétés des sciences naturelles. Office central de faunistique (eds.), Paris: 221 p.
- Villiers A., 1946. Coléoptères Cérambycides de l'Afrique du Nord. Office de la recherche scientifique coloniale, Paris: 157 p.
- Wermelinger B., Rigling A., Schneider Mathis D. & Dobbertin M., 2008. Assessing the role of Bark and Woodboring insects in the decline of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Swiss Rhone valley. *Ecological Entomology*, 33: 239-249.

CHAPITRE 11

Lois de croissance et production en bois du pin d'Alep en Tunisie

**Wahbi Jaouadi^{1 et 2}, Naceur Boussaidi¹, Kaouther Mechergui^{1 et 2}, Ali Aloui³,
Messaoud Meliane³, Mokhtar Aloui², Youssef Ammari² et Mohamed Larbi
Khouja²**

¹*Institut Sylvo-Pastoral de Tabarka. 8110 Tabarka.*

²*Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts. BP. 10. Rue Hédi Karray. Ariana 2080.*

Université de Carthage, Université Manar, Tunisie

³*Expert international en Aménagement et Sylviculture des Forêts*

Résumé. Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des études qui ont été faites sur la croissance et la production du pin d'Alep en Tunisie. Les résultats montrent que la production en bois du pin d'Alep en Tunisie croit avec les potentialités de la station. Ces dernières sont en étroite relation avec l'étage bioclimatique et la fertilité du sol. La production passe de 0,4 à 4 m³/ha/an pour une hauteur dominante variant entre 9,7 m et 22,8 m. Les études confirment que l'accroissement annuel moyen maximum du pin d'Alep est de 3,3 m³/ha/an à un âge de 40 ans dans les bonnes stations et chute à moins de 0,5 m³/ha/an pour la quatrième et dernière classe de productivité à un âge qui dépasse les 100 ans. Les travaux de recherche montrent que la croissance en hauteur du pin d'Alep en Tunisie se ralentit entre 50 et 70 ans selon les forêts et qu'à 75 ans, cette croissance est plafonnée et n'évolue plus dans toutes les forêts. Les meilleures croissances en diamètre et en hauteur du pin d'Alep ont été obtenues sous forte intensité d'ombrage (139%). Par contre, sous 82 % d'ombrage, le diamètre et son accroissement annuel ont accusé une réduction significative par rapport aux fortes intensités. En Tunisie, la production des peuplements artificiels et ceux issus de régénération après incendie est beaucoup plus forte que dans les forêts naturelles et elle est plus faible dans les vieux peuplements. Les résultats confirment que la fertilité des stations à pin d'Alep, dépend essentiellement de la profondeur du sol exploitable par les racines, l'épaisseur de l'humus, la texture du sol et le relief. Les aménagements des deux dernières décades ont montré, par ailleurs, que la productivité du pin d'Alep en graines (zgougou) est rentable. Néanmoins, les forêts du pin d'Alep en Tunisie jouent encore un rôle de protection qui mérite une attention particulière de la part des gestionnaires forestiers quant à la régénération et l'exploitation de l'espèce. Les résultats de cette synthèse constituent un outil de travail que nous considérons essentiel à tout gestionnaire forestier soucieux de planifier les différentes interventions sylvicoles sur la base des connaissances scientifiques relatives à la croissance et à la production de l'espèce dans les différents milieux de croissance. Ces résultats peuvent être utilisés dans les inventaires de gestion forestière pour l'aménagement des peuplements du pin d'Alep.

Mots clés : pin d'Alep, *Pinus halepensis*, lois de croissance, production en bois, accroissement.

Abstract: Growth laws and production wood of Aleppo pine in Tunisia. This work presents a bibliographic synthesis of the studies that have been done on the growth and production of Aleppo pine in Tunisia. The results show that the timber production of Aleppo pine in Tunisia is growing with the potential of the station which is closely related to the bioclimatic stage and the fertility of the soil. The production increases from 0.4 to 4 m³/ha/year for a dominant height varying between 9.7 m and 22.8 m. Studies confirm that the average annual maximum growth of Aleppo pine is 3.3 m³/ha/year at age 40 in good stations and falls to less than 0.5 m³/ha/year for fourth and last class of productivity at an age exceeding 100 years. Research shows that growth in height of Aleppo pine in Tunisia slows down between 50 and 70 years depending on the forest and at 75 years, this growth is capped and no longer evolves in all forests. The best growth in diameter and height of Aleppo pine was obtained with high shading intensity (139%). On the other hand, under 82 % shading the diameter and its annual increment showed a significant reduction compared to the high intensities. In Tunisia the production of artificial stands and those resulting from regeneration after fire is much higher than in natural forests and it is lower in old stands. The results confirm that the fertility of the Aleppo pine stations depends mainly on the depth of the soil usable by the roots, the thickness of the humus, the texture of the soil and the relief. Developments over the past two decades have shown that the productivity of Aleppo pine seed (zgougou) is profitable. Nevertheless, the Aleppo pine forests in Tunisia still play a protective role that deserves special attention from forest managers as regards the regeneration and exploitation of the species. The results of this synthesis therefore constitute a working tool that we consider indispensable for any forest manager concerned with planning the various silvicultural interventions based on scientific knowledge of the growth and production of the species in the different growth environments. . These results can be used in forest management inventories for the management of Aleppo pine stands.

Keywords: Aleppo pine, *Pinus halepensis*, growth laws, wood production, growth.

1. Introduction

La forêt du pin d'Alep a subi depuis des siècles de fortes pressions humaines (défrichements, coupes illicites, incendies, pâturages), causant la régression du couvert végétal. A cela s'ajoutent ces dernières années les sécheresses successives et prolongées qui sont à l'origine du dessèchement et du dépérissement des arbres sur pied. Dans le domaine de la production et de la croissance, le pin d'Alep a fait l'objet de nombreux travaux dans les pays du pourtour méditerranéen, notamment en France (Bedel, 1986 ; Couhert et Duplat, 1992 ; Brochiero, 1999), en Espagne (Montero *et al.* 2001), au Maroc (Belghazi *et al.* 2000), en Italie (Orazio, 1986), en Algérie (Bentouati, 2006) et en Tunisie

(Souleres, 1969 et 1975 et Chakroun, 1986 ; Sghaier et Ammari, 2012 ; Sghaier et Garchi, 2009 ; Ammari *et al.* 2001). En raison de ses faibles exigences et de sa grande plasticité, le pin d'Alep a été utilisé à grande échelle comme essence de reboisement pour reconstituer les zones dégradées, malgré sa faible productivité. En effet, le pin d'Alep est parmi les rares espèces qui poussent facilement sur des sols pauvres, secs et riches en calcaire. En régions semi-désertiques, notamment en Libye, il s'est distingué par sa tolérance à la sécheresse, puisqu'il se contente de 250 mm de précipitations annuelles. En revanche, il craint les périodes de gel prolongées et devient très vulnérable face aux chutes de neige importantes car ses branches sont fragiles et cassent facilement (Ricodeau, 2013).

2. Productivité et accroissement du pin d'Alep

L'une des caractéristiques importantes d'un peuplement forestier que le sylviculteur désire connaître avec précision est sa production de bois (Garbaye *et al.* 1970). Cette production, en termes sylvicoles correspond au volume de l'arbre avec ou sans les branches, sous ou sur écorce. Le volume est évalué à partir des méthodes de cubage utilisant des paramètres simples telles que les diamètres (ou les circonférences) et les hauteurs mesurées sur des arbres bien choisis et répartis de la façon la plus représentative des milieux de croissance. La hauteur dominante à un âge de référence permet de classer les peuplements dans une échelle de fertilité et possède aussi une excellente relation avec la production totale (Bentouati, 2006). Dans le domaine de la productivité, les études sont nombreuses, elles sont réalisées par différents auteurs et dans différents pays du pourtour méditerranéen (Parde, 1957, 1967 ; Decourt, 1966 et 1973 ; Lemoine, 1969 et 1982 ; Garbaye *et al.* 1970 ; Souleres, 1975 et 1969 ; Yi, 1976 ; Ottorini, 1981 ; M'hirit, 1982 ; Toth *et al.* 1983 ; Couhert et Duplat, 1993 ; Sghaier *et al.* 2001 ; Ammari *et al.* 2001 ; Sghaier *et al.* 2012). Souleres (1969) montre que la production du pin d'Alep en Tunisie croît avec les potentialités de la station, qui sont en étroite relation avec l'étage bioclimatique et la fertilité du

sol. Dans les forêts étudiées, pour une surface terrière moyenne de 7 m², la productivité passe de 0,67 m³/ha/an en semi-aride inférieur à 0,82 m³/ha/an en semi-aride supérieur et à 0,95 m³/ha/an en sub humide. Sghaier et Ammari (2012) montrent que l'accroissement annuel moyen maximum du pin d'Alep est de 3,3 m³/ha/an à un âge de 40 ans dans les bonnes stations et chute à moins de 0,5 m³/ha/an pour la quatrième et dernière classe de productivité à un âge qui dépasse les 100 ans. Boudy (1950) et Chakroun (1986) affirment que les forêts naturelles du pin d'Alep possèdent des capacités de production très faibles qui varient de 0,5 à 3-4 m³/ha/an dans les bonnes stations comparativement avec son congénère le pin maritime de montagne en peuplement artificiel dont l'accroissement varie de 1,2 m³/ha/an à 5,8 m³/ha/an. Ammari *et al.* (2001) ont conclu que pour le pin d'Alep et à un âge de référence de 45 ans, le volume total sur pied a été estimé à 155 ; 71,5 ; 40,9 et 15,3 m³/ha respectivement pour les classes de fertilité 1, 2, 3 et 4. Celles-ci ont été caractérisées par une hauteur dominante référentielle comprise entre 4,5 et 13,5 m. En outre, l'accroissement annuel moyen en volume a varié entre 0,7 et 5,1 m³/ha/an selon la fertilité du site. Les caractéristiques dendrométriques au sein de chacune des classes de croissance sont présentées au tableau 1.

Bentouati (2006) rapporte que le pin d'Alep en Algérie présente dès l'âge de 50 ans, un ralentissement de croissance en hauteur qui s'accroît pour devenir de plus en plus important au-delà de 80 ans. Cette constatation va dans le même sens que les observations de Souleres (1969) qui remarque que la croissance en hauteur du pin d'Alep en Tunisie se ralentit entre 50 et 70 ans selon les forêts et qu'à 75 ans, cette croissance est plafonnée et n'évolue plus dans toutes les forêts.

Tableau 1: Caractéristiques dendrométriques des quatre classes de croissance selon Ammari *et al.* (2001).

Paramètre	Clas. 1	Clas. 2	Clas. 3	Clas. 4
Indice du site (m)	18,69	14,55	9,84	6,08
Hauteur dominante : H_d (m)	13,46	11,27	9,09	7,34
Circonférence de l'arbre moyen : C_g (m)	0,71	0,53	0,46	0,41
Surface terrière moyenne par hectare : G/ha	28,99	18,62	12,85	10,93
Densité moyenne par hectare : N/ha	732	934	804	831
Age moyen : A_m (années)	29	36	44	57
Volume par hectare : V/ha (m^3 /an)	147,91	92,16	51,73	38,03
Accroissement annuel moyen en volume : AAM V (m^3 /ha/an)	5,1	2,56	1,18	0,67
Accroissement annuel moyen en hauteur dominante : AAM H_d (m/an)	0,46	0,31	0,21	0,13
Accroissement annuel moyen en circonférence : AAM C_g (cm/an)	2,44	1,97	1,05	0,72

En Italie, Orazio (1986) rapporte des accroissements moyens annuels en volume qui varient de 1,9 et 12,2 m^3 /ha/an à 25 ans d'âge pour la première classe de fertilité et à 50 ans pour la dernière. En France, Parde (1956) cite une production de 4 m^3 /ha/an dans des stations de fertilité exceptionnelle à un âge de 75 ans. Dans les massifs de Ouled Yagoub et des Béni-Oudjana, les données recueillies dans les peuplements échantillonnés montrent que l'accroissement moyen en volume varie de 0,5 à 4,8 m^3 /ha/an (Bentouati, 2006). L'accroissement moyen maximum en volume, toutes classes confondues, culmine à 2,8 m^3 /ha/an pour les massifs de Ouled-Yagoub et des Béni-Oudjana en Algérie à un âge de 80 ans et à un âge plus précoce n'excédant pas les 60 ans pour les peuplements d'Espagne alors qu'il atteint 2,6 m^3 /ha/an pour un âge de référence de 50 ans pour les peuplements de Provence-France (Bentouati, 2006). Notons qu'au Maroc, la productivité des peuplements de Tamga pour 3 classes de fertilité différentes atteint une valeur moyenne de 2,5 m^3 /ha/an pour un âge avoisinant les 75 ans (Belghazi *et al.*, 2000). Dans une étude sur l'influence de l'ombrage sur la structure et l'accroissement du pin d'Alep à Jebel Mansour en Tunisie, Garchi *et al.* (1999) ont montré que les meilleures croissances en diamètre et en

hauteur ont été obtenues sous forte intensité d'ombrage (139%). Par contre, sous 82 % d'ombrage, le diamètre et son accroissement annuel ont accusé une réduction significative par rapport aux fortes intensités. Serre-Bachet (1992) et Vila *et al.* (2008) indiquent qu'une augmentation de précipitations est favorable à la croissance du pin d'Alep qui est également en étroite relation avec l'altitude et la continentalité. Guit *et al.* (2015) montrent l'existence d'un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) des deux facteurs «Altitude» et «Exposition» sur les paramètres dendrométriques «Hauteur dominante» et «Densité». Mérian et Lebourgeois (2011) montrent qu'il existe une forte corrélation positive entre les précipitations et la croissance radiale des arbres. Les meilleures croissances du pin d'Alep sont obtenues dans les stations qui se trouvent entre 100 et 300 m d'altitude (Vennetier *et al.*, 2010). En zone méditerranéenne française et en dessous de 600 m d'altitude, le pin d'Alep présente de fortes variations de croissance liées à ses exigences écologiques puisqu'il s'adapte plus ou moins bien à tous les types de stations, à l'exception des sols à hydromorphie proche de la surface où il est exclu. Les principaux facteurs influençant la croissance du pin d'Alep sont liés au bilan hydrique de la station, le bilan trophique étant marginal (Vennetier *et al.* 2010). Selon les chiffres fournis par l'observatoire de la forêt méditerranéenne, le pin d'Alep possède une croissance moyenne de 3 à 5 m³/ha/an (Ricodeau, 2013). En Italie, Ciancio (1986) cite des accroissements moyens de 10 à 12 m³/ha/an dans de bonnes stations. Souleres (1969) a conclu qu'en Tunisie la production des peuplements artificiels et ceux issus de régénération après incendie est beaucoup plus forte que dans les forêts naturelles et elle est plus faible dans les vieux peuplements. Le tableau 2 illustre une comparaison entre les différentes études qui ont été faites en Tunisie et dans d'autres pays sur les accroissements du pin d'Alep pour différentes classes de fertilité et de hauteurs dominantes.

Tableau 2: Accroissements moyens maxima établis pour le pin d'Alep pour différentes classes de fertilité et de hauteurs dominantes (Bentouati, 2006).

Auteurs	Classe de fertilité	H _{dom} (m)	AMM (m ³ /ha/an)
Couhert et Duplat (1993) France (Provence)	1	H _{dom} à 50 ans	16
	2		06 à 80 ans
	3		03 à 70 ans
Parde (1957) France	1	H _{dom} à 75 ans	08
	2		21
	3		04
Brochiero (1999) France	1	H _{dom} à 70 ans	03
	2		18
	3		14
	4		23,4
	5		05 à 70 ans
	6		20,1
Montéro (2000) Espagne	1	H _{dom} à 60 ans	03 à 50 ans
	2		16,7
	3		02 à 30 ans
	4		13,4
Belghazi <i>et al.</i> (2000) Maroc	1	H _{dom} à 60 ans	01 à 20 ans
	2		10
	3		-
Frantz et Forster (1979) Algérie (Béni-imploul)	1	H _{dom} à 100 ans	06,7
	2		20
	3		04 à 50 ans
	4		17
Ammari <i>et al.</i> (2001) Tunisie	1	H _{dom} à 45 ans	3,1 à 50 ans
	2		14
	3		2,4 à 60 ans
	4		11
Bentouati (2006) Algérie (Oued Yagoub et Béni Oudjana)	1	H _{dom} à 70 ans	1,5 à 70 ans
	2		16,9
	3		3,9
	4		1,9
AMM : Accroissement moyen maxima, H _{dom} : hauteur dominante, H _{tot} : hauteur totale moyenne.			

Dans le même sens, Garchi (1991) montre que la fertilité des stations à pin d'Alep dépend essentiellement de la profondeur du sol exploitable par les racines, l'épaisseur de l'humus, la texture du sol et le relief. En effet, les stations sur sol peu évolué d'apport colluvial riche à texture limono-argileuse ont une classe de fertilité 1, et correspondent à un *site index* à l'âge de 50 ans de 13,5 à 16,5 m. Les stations sur sol brun calcaire et rendzine correspondent au niveau de fertilité 2, leur *site index* à l'âge de 50 ans est de 10,5 à 13,5 m. Sghaier *et al.* (2001) ont identifié quatre classes de fertilité, ayant respectivement comme hauteur référentielle à 45 ans d'âge par ordre décroissant : 13,5 ; 10,5 ; 7,5 et 4,5

m. La répartition des placettes échantillonnées a révélé qu'environ 49 % des peuplements du pin d'Alep en Tunisie appartiennent à la troisième classe de fertilité. Akrimi (1984) et Garchi (1991) ont étudié la production du pin d'Alep dans le Nord-Ouest de la Tunisie (région de Sakiet). Le premier auteur situait cette production entre 0,4 et 4 m³/ha/an pour une hauteur dominante variant entre 9,7 m et 22,8 m (tableau 3), tandis que le deuxième a défini trois classes de fertilité, où la hauteur dominante atteinte à l'âge de 80 ans serait comprise entre 5 m et 15m respectivement pour la classe de fertilité la moins et la plus favorable (tableau 4).

Tableau 3 : Production en bois du pin d'Alep dans la région de Sakiet Sidi Youssef (Tunisie Septentrionale) d'Après Akrimi (1984).

Station	Hauteur totale (m)	Hauteur dom. (m)	Production de bois fort (m ³ /ha/an)	Observations
Jebel Ouergha (sud)	9,7	11,5	0,35	Bioclimat semi-aride, sol du type rendzine
Jebel Ouergha (nord)	8,9	10,5	0,86	Bioclimat semi-aride, sol brun calcaire marneux
Sakiet - Mine	12	14,5	1,16	Bioclimat semi-aride, sol peu évolué d'apport alluvial
Jebel Laardia	10,9	12,1	1,71	Bioclimat subhumide, sol lourd à caractère vertique
Jebel Soudane	13,1	17,9	3,09	Bioclimat subhumide, sol du type rendzine
Koudiat Essid	17,3	22,8	4,36	Bioclimat subhumide, sol peu évolué d'apport alluvial
Jebel Takrouna	10,5	12	2,52	Bioclimat subhumide, sol du type rendzine
Ghar Ettine	7,8	9,7	2,26	Bioclimat subhumide, sol du type rendzine sur colluvium marneux
Ras Jebel	11,1	12,8	1,96	Bioclimat subhumide, sol du type rendzine
Ain Amara	12,8	15,6	1,76	Bioclimat subhumide, sol rouge fertialitique argileux

Selon Couhert et Dulpart (1993), l'âge d'exploitabilité, pour une classe de fertilité élevée (H_{dom} 16 m à 50 ans), est de 80 ans, 3 éclaircies fortes à 30, 45 et 60 ans sont réalisées, et les prélèvements correspondants sont de 53 %, 50 % et 43 % en nombre de tiges et de 45 %, 42 % et 36 % en surface terrière.

Tableau 4: Classes de fertilité des différents types phytosociologiques (d'après Garchi, 1991).

Type phytosociologique	Classe de fertilité	Hauteur dominante à 80 ans (m)
<i>Quercu-Pistacietum terebinthae</i>	1	15
	2	13
	3	11
<i>Quercu-Pinetum halepensis</i>	1	13
	2	12
	3	9
<i>Pino-Ericetosum multiflorae</i>	1	12
	2	9
	3	7
<i>Pinetum halepensis-Rosmarinetosum officinalae</i>	1	10
	2	8
	3	6
<i>Pinetum halepensis-Juniperetosum phoenicæ</i>	1	9
	2	7
	3	5

Du point de vue production totale et accroissement annuel moyen, les peuplements du pin d'Alep de la première classe de productivité en Tunisie sont comparables à celles de la deuxième classe en Espagne et en Algérie (tableau5).

Tableau 5 : Comparaison de la production du pin d'Alep en Tunisie, Espagne et Algérie (à 80 ans) d'après Sghaier et Ammari (2012).

	Tunisie			Espagne				Algérie				
	Classe											
	1 ^{ere}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	1 ^{ere}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	1 ^{ere}	2 ^{eme}	3 ^{eme}	4 ^{eme}	
Dg	38	35	32	39	31	23	18	51	43	34	26	
N	248	201	149	246	408	684	862	169	197	237	300	
Hd	15,9	12,8	9,6	20,0	17,0	14,0	11,0	20,7	17,5	14,2	10,9	
Vt	251	143	66	285	230	186	114	350	264	184	108	
AAM	3,1	1,8	0,8	3,6	2,9	2,3	1,41	4,4	3,3	2,3	1,3	

Dg : diamètre moyen quadratique, N : nombre de tiges/ha : Hd : hauteur dominante, Vt : volume total (m³/ha) : AAM : accroissement annuel moyen (m³/ha/an).

Toutefois, le diamètre quadratique moyen en Tunisie (38 cm) qui semble être lié directement à la densité (Sghaier et Ammari, 2012), occupe une position intermédiaire entre celui de l'Algérie (42,5 cm) et celui de l'Espagne (30,7 cm). D'après Kadik, (1987) la productivité du pin d'Alep varie en Algérie suivant les zones géographiques (Tableau 6).

Tableau 6 : Estimation de la production du bois du pin d'Alep par le milieu (Kadik, 1987).

Milieu	Estimation de la production de bois
Littoral et sub-littoral	Production supérieure à 4 m ³ /ha/an
Tell	Production estimée entre 2 et 4 m ³ /ha/an
Sub-saharien	Production estimée entre 1 et 2 m ³ /ha/an

Enfin, une étude sur l'effet des changements climatiques sur la productivité des forêts du pin d'Alep en Tunisie (El Khorchani, 2006) a montré que la croissance radiale de cette espèce a enregistré une baisse significative pour la période 1950-2001. Cette diminution de la productivité du pin d'Alep naturel est attribuée à une augmentation du stress hydrique engendrée par une diminution des précipitations et à une augmentation des températures.

Pour le cubage d'arbre individuel, deux tarifs, à une et à deux entrées, sont élaborés par Sghaier *et al.* (2008). Ces tarifs permettent d'estimer le volume du bois jusqu'à la découpe de 22 cm de circonférence d'arbres individuels abattus ou sur pied (tableau 7). Sghaier et Ammari (2012) ont montré qu'une équation à une entrée peut être utilisée, comme méthode rapide d'estimation, pour cuber les tiges de petite et moyenne dimensions dont la circonférence à hauteur d'homme ne dépasse pas 60 cm. Pour des tiges de dimensions plus importantes, il est conseillé recourir à un tarif à deux entrées qui donne des estimations plus précises (Sghaier *et al.*, 2008). Les tarifs de cubage élaborés pour les peuplements du pin d'Alep en Tunisie sont présentés dans le tableau 7.

Selon DGF (2010), le volume total sur pied produit par le pin d'Alep est de 1225468 m³ dans la région du Kef, de 241820 m³ à Jendouba, et de 203845 m³ en forêt naturelle et de 8899 m³ en reboisement à Béja. La forêt claire du pin

d'Alep de Siliana produit 146488 m³ et celle dense produit 544592 m³. La production à Nabeul est de l'ordre de 62830 m³, à Zaghouan est de 215131 m³ et à Kairouan le volume du pin d'Alep sur pied a été estimé à 158190 m³ (Tableau8).

Tableau 7 : Tarifs de cubage des peuplements du pin d'Alep en Tunisie d'après Ammari *et al.* (2001) et Sghaier *et al.* (2008).

	Tarif à une entrée	Tarif à deux entrées
Ammari <i>et al.</i> 2001	$v = 3,05 \times 10^{-6} c^{2,593}$ avec $R^2 = 0,849$	$v = -5,86 \times 10^{-5} x c + 3,9 \times 10^{-6} c^2 h$ avec $R^2 = 0,950$
	La circonférence (c), la hauteur (h) et le volume (v) sont exprimés respectivement en cm, m et m ³ /ha	
Sghaier <i>et al.</i> 2008.	$v = -47,820 + 3,287 x c - 6,078 \times 10^{-2} x c^2 + 9,193 \times 10^{-4} x c^3$ avec $R^2 = 0,898$	$v = -36,220 + 2,663 x c - 5,666 \times 10^{-2} x c^2 + 5,023 \times 10^{-4} x c^3 + 3,000 \times 10^{-3} x c^2 h$ avec $R^2 = 0,936$
	Où la circonférence (c) est exprimée en centimètre (cm), la hauteur totale (h) en mètre (m) et le volume (v) en décimètre cube (dm ³)	

Tableau 8 : Estimation des volumes du pin d'Alep en Tunisie par types de peuplement et leur superficie par gouvernorat (DGF, 2010).

Gouvernorat	Peuplement de pin d'Alep	Superficie (ha)	Volume moyen m ³ /ha	Volume total sur pied (m ³)
Béja	Peuplement très dense	4713	43,253	203 845
	Peuplement dense	2507	18,969	47549
	Peuplement claire	3890	05,898	22946
Bizerte	Peuplement (DN)*	4870	50,479	245825
Jendouba	Peuplement (DN)*	4254	56,842	241820
Nabeul	Peuplement (DN)*	2995	20,978	62830
Kef	Peuplement (DN)*	35869	34,165	1225468
	Peuplement (DN)*	15700	63,992	1004692
	Peuplement (DN)*	9427	52,547	495362
	Peuplement (DN)*	2598	25,351	65875
	Peuplement (DN)*	3200	55,430	177356
	Peuplement (DN)*	1778	31,245	55539
Zaghouan	Peuplement clair	15020	14,323	215131
	Peuplement très dense	7622	25,668	195640
	Peuplement moyennement dense	5726	11,854	67873
	Peuplement dense	3993	20,695	82640
Siliana	Peuplement moyennement dense	25525	21,336	544592
	Peuplement Très dense	17778	24,723	464244
	Peuplement dense	1727	25,284	43654
Kairouan	Peuplement (DN)*	6419	24,644	158190
Kasserine	Peuplement clair	45340	30,344	1375798
Kasserine Ben Arous	Peuplement Très dense	37796	37,870	1431318
	Peuplement dense	26101	32,177	839858
	Peuplement (DN)*	1926	04,563	8789
Manouba	Peuplement (DN)*	2171	19,560	42470
Mahdia	Peuplement (DN)*	398	17,814	7090
Sousse	Peuplement (DN)*	1326	17,814	23621
Sidi Bouzid	Peuplement (DN)*	7846	21,789	170950
Gafsa	Peuplement (DN)*	679	23,418	15902

* (DN) : densité non précisée.

3. Conclusion

Nous avons essayé de présenter dans ce travail les résultats chiffrés, issus des études qui ont été faites sur la croissance et la production en bois du pin d'Alep en Tunisie par comparaison à certains pays méditerranéens aux

conditions climatiques homologues. A travers cette synthèse bibliographique, nous avons constaté que les forêts du pin d'Alep en Tunisie offrent de faibles productions ligneuses. En revanche, les aménagements des deux dernières décennies ont montré que leurs productions en graines (zgougou) est nettement plus importante et économiquement plus rentable. Néanmoins, malgré ces faibles productivités les forêts tunisiennes continuent à jouer un rôle de protection qui ne manque pas d'intérêt aussi bien dans le contexte climatique actuel que futur. Ce constat exige une attention particulière de la part des gestionnaires forestiers pour rationaliser l'exploitation de l'espèce et assister sa régénération actuellement en difficulté. Sur le plan pratique, cette synthèse constitue un diagnostic descriptif et analytique du potentiel productif du pin d'Alep, et peut par ailleurs servir comme outil de décision pour les différents intervenants dans le secteur forestier : sylviculteurs, aménagistes et exploitants forestiers.

Références bibliographiques

- Akrimi N., 1984 - *Relations entre production et sols dans la pineraie de Sakiet Sidi Youcef (Tunisie septentrionale)*. Thèse de doctorat. Univ. Droit. Eco. d'Aix Marseille: 179 p.
- Ammari Y., Sghaier T., Khaldi A., Garchi S., 2001 - Productivité du pin d'Alep en Tunisie : Table d Production. Annales de L'INRGREF N° Spécial. pp. 239-246.
- Bedel J., 1986. Aménagement et gestion des peuplements de pin d'Alep dans la zone méditerranéenne française. *Options Méditerranéennes*. Série Etude CIHEAM **86** / 1, 127-156.
- Belghazi B., 1998 - Eclaircies dans les plantations de pins. Thème 4. Rapport de mission. Deuxième projet de développement forestier. 21 p + annexes.
- Belghazi B., Ezzahiri M., Romane F., 2000. Productivité de peuplements naturels de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans la forêt de Tamga (Haut Atlas, Maroc). *Cahiers Agricultures*, **9** (1), 39-46.
- Bentouati A., 2006 - *Croissance, productivité et aménagement des forêts de pin d'Alep (Pinus halepensis M.) du massif de Ouled Yagoub (Khenchela-Aurès)*. Doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques. Université El Hadj Lakhdar-Batna faculté des sciences. Département d'Agronomie. 116 p.
- Boudy P., 1950 - *Economie forestière nord-africaine. Monographie et traitement des essences forestières*. Tome 2. Fasci 2, 529-878. Ed. La rose. Paris.
- Boudy P., 1952 - Guide du forestier en Afrique du nord Ed. Maison Rustique. Paris, 505p.
- Brochiero F., Chandiooux O., Ripert C., Vennetier M., 1999. Autécologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire. *Forêt méditerranéenne*, XX (2), 83-94.

- Chakroun M.L., 1986 - Le pin d'Alep en Tunisie. *Options Méditerranéennes*. Série Etude CIHEAM 86/1, 25-27.
- Ciancio N., 1986 - Sylviculture du pin d'Alep, *Options méditerranéennes*. Série Etudes du C.I.H.E.A.M. n : 01.
- Couhert B., Duplat P., 1993 - Le pin d'Alep. Rencontres forestiers-chercheurs en forêt méditerranéenne. La Grande-Motte (34), 6-7 octobre 1993. Éd. INRA, Paris, (les colloques no : 63) : 125-147.
- Decourt N., 1966 - Instructions pour l'assiette et les mensurations des placettes temporaires et semi-permanentes. Station de sylviculture et de production, 8 p.
- Decourt N., 1973. Protocole d'installation et de mesures des placettes de production semi-permanentes. *Ann. Sci. Forest.*, **29** (1), 49-65.
- El Khorchani A., 2006 - *Approche dendrochronologique de l'influence des changements climatiques sur la productivité des forêts de pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en Tunisie*. Thèse de doctorat. Université Paul Cézanne, Aix-Marseille (France), 211 p.
- Frantz F., Forster H., 1979 - *Table de production de pin d'Alep pour les Aurès (Algérie)*. *Chaire de la production forestière de l'université de Munich*, 114 p.
- Garbaye J., Leroy P.H., Le Tacon F., Levy G., 1970 - Réflexions sur une méthode d'études des relations entre facteurs écologiques et caractéristiques des peuplements. *Ann. Sci. Forest* **27** (3) 303-321.
- Garchi S., Ammari Y., Sghaier T., Khaldi A., 2001 - Étude du comportement du pin d'Alep en Tunisie. *Annales de l'INRGREF*, no spécial : 147-162.
- Garchi S., 1991 - *Approche multidimensionnelle de la typologie et de la cartographie des stations à pin d'Alep de la région de Touiref (Tunisie Septentrionale)*. Thèse doctorat. Université Catholique de Louvain-La-Neuve. Faculté des Sciences Agronomique. 219 p + annexes.
- Garchi S., Ben Mansoura A., 1999 - Influence de l'ombrage sur la structure et l'accroissement du pin d'Alep à Jbel Mansour. *Annales de l'INRGREF*. (3), 89-102.
- Guit B., Nedjimi B., Guibal F., Chakali G., 2015 - Dendroécologie du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en fonction des paramètres stationnels dans le massif forestier de Senalba (Djelfa, Algérie) *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, Vol. **70** (1) : 32-43.
- DGF. Inventaire National Forestier. Direction Générale des Forêts. 2010 - Inventaire des forêts par télédétection. Résultats du deuxième inventaire forestier et pastoral national.
- Kadik B., 1987 - Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) en Algérie : Ecologie, Dendrométrie, Morphologie. Office des publications universitaires (Alger). 585 p.
- M'hirit O., 1982 - *Etude écologique et forestière des cédraies du Rif marocain. Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la productivité du cèdre (Cedrus atlantica Manetti)*. Thèse de Doct. Es-sciences. Univ. Droit. Econo. et Sci. d'Aix - Marseille, 436 p + annexes.
- Mérian P., Lebourgeois F., 2011 - size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: a multi-species analysis. *For. Ecol. Manag.*, **261**: 1382-1391.
- Montero G., Canellas I., Ruis-Peinado R., 2001 - Growth and Yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Invest. Agr. Sist. Recur. For.*, **10** (1), 24 p.

- Orazio C., 1986 - Sylviculture du pin d'Alep. *Options Méditerranéennes*. Série Etude CIHEAM 86/1, 47-54.
- Ottorini J.M., Nys C., 1981 - Application des données de l'inventaire forestier national à l'étude de la production du Pin sylvestre en Margeride : Etude de la croissance en hauteur. *Ann. Sci. Forest.*, **38** (2), 223-236.
- Parde J., 1956 - Une notion pleine d'intérêt : la hauteur dominante des peuplements forestiers. *Rev. For. Fr.* VIII (12), 850-856.
- Parde J., 1957 - La productivité des forêts de pin d'Alep en France. *Ann. E.N.E.F de la Stat. Rech. Expér.* **15** (2), 367-414.
- Parde J., 1967 - Réflexion sur la productivité des forêts françaises. Centre national de Recherches forestières, Nancy, 477- 485 p.
- Ricodeau N., 2013 - *Développement de modèles sylvicoles de Pin d'Alep. Quelle est la valeur du Pin d'Alep ?* PFE. Agro Paris Tech. ENGREF. Formation des ingénieurs forestiers. 60 p.
- Serre-Bachet F., 1992 - Les enseignements écologiques de la variation de l'épaisseur du cerne chez le pin d'Alep. *Forêt Méd.*, **8**: 171 -176.
- Sghaier T., Ammari Y., Garchi S., Khaldi A., 2001 - Croissance en hauteur et classes de fertilité du pin d'Alep. *Annales de l'INRGREF*. N Spécial, 45-53.
- Sghaier T., Garchi S., 2009 - Modélisation de la croissance en hauteur dominante et fertilité des peuplements de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Ecologia Mediterranea* **35** : 49-63.
- Sghaier T., Ammari Y., Garchi S., 2008 - Étude et choix d'équations de cubage d'arbres pour le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Revue de l'INAT* **23**, 2 : 199-225.
- Sghaier T., Ammari Y., 2012 - Croissance et production du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Ecologia Mediterranea* - Vol. **38** (1). 39-57.
- Souleres G., 1969 - Le pin d'Alep en Tunisie : *Annales de l'Inst. Nat. Rech. Forest.* Tunisie. Vol **2**. Fasc.126 p.
- Souleres G., 1975 - Classes de fertilité et production des forêts tunisiennes de pin d'Alep. *Rev. For. Fr.*, XXVII (1), 41-49.
- Toth J., Turrel M., 1983 - La productivité du pin noir d'Autriche dans le sud-est de la France. *Rev. For. Fr.*, XXXV (2), 111-120.
- Vennetier M., Ripert C., Brochiéro F., Rathgeber C.B.K., Chandioix O., Estève R., 2010 - Evaluation de la croissance du pin d'Alep en région méditerranéenne française. *Revue Forestière Française*, n°5.
- Vila B., Vennetier M., Ripert C., Chandioix O., Liang E.Y., Guibal F., Torre F., 2008 - Les changements globaux ont-ils déjà induit des changements de croissance en forêt méditerranéenne ? Le cas du pin d'Alep et du pin sylvestre de la sainte-baume. *Forêt Méd.* **21**: 161 -166.
- Yi B.G., 1976 - *Croissance du cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica Manetti), en relation avec quelques variables du milieu en Languedoc-Roussillon (France)*.Thèse de Doct. Ing., Univ. Sci. Tech. Du Languedoc., 193 p + annexes.

CHAPITRE 12

Les incendies dans les forêts de pin d'Alep en Tunisie : historique et stratégie de lutte

Salem Sebei¹, Abdelmoula Kais¹, Abdelhamid Khaldi¹ et Samir Belhaj²

¹*Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), B.P. 10, 2080 Ariana, Université de Carthage, Tunisie*

²*Direction Générale des Forêts*

Email: sebei_salem@yahoo.fr

Résumé. Le feu de forêt est le facteur majeur de dégradation des forêts tunisiennes. Il a détruit des surfaces importantes depuis le début du siècle dernier, les données statistiques montrent que les forêts du pin d'Alep sont les plus touchées par les incendies et les plus menacées par ce fléau. Les grands incendies qu'a connus la Tunisie coïncident avec les grands événements historiques et les anomalies climatiques telle que la deuxième guerre mondiale et les grandes sécheresses des années vingt et des années quarante. La répartition des incendies de 1984 -2009 par gouvernorat montre que les incendies affectent très peu les steppes et s'attaquent essentiellement aux pinèdes et maquis. Les feux de forêt atteignent leur paroxysme au mois d'août. Les causes des incendies sont, pour la plupart, inconnues, cependant l'imprudence est la cause principale du déclenchement des feux en milieux forestiers. La Tunisie a instauré une politique de lutte contre les incendies qui comporte deux volets l'un technique par l'ouverture de pistes et tranchées pare-feu, l'implantation de points d'eau et l'élaboration des bulletins du risque d'incendies en collaboration avec l'Institut National de Météorologie (INM) pendant la période estivale et l'autre législatif pour conserver les forêts par la promulgation des décrets d'ordre préventif et répressif. L'exploitation de la base de données des bulletins, montre que la fréquence des jours à degré météorologique risque incendie de forêt sévère est enregistré pendant le mois de juin. Au cours du mois de juillet, la quasi-totalité des stations ne présentent pas de jours à niveau de risque nul, à l'exception de la station de Bizerte. Les premiers postes vigies ont été créés par le décret beylical du 18 juin 1895 dans la kroumirie pour assurer la surveillance des chênaies. Pour les forêts de pin d'Alep, il faut attendre le début du XX^e siècle pour voir les premières installations. Les tranchées pare-feu ont des largeurs variables, en moyenne 50 mètres. Elles ne sont pas dessouchées, pour des raisons économiques. Le premier décret qui défend de mettre le feu pendant la saison chaude aux chaumes et aux boisements remonte à la période de règne du Bey Mohamed Es Sadok (1870). Les textes législatifs dont le code forestier de 1988 ont évolué depuis cette date vers la conservation des terrains incendiés en interdisant le pacage dans les forêts naturelles ou artificielles issues d'incendie, dont les arbres ont moins de 2 m de hauteur.

Mots clés: incendie, pin d'Alep, poste vigie, tranchée pare-feu.

Abstract. Fires in Aleppo pine forests in Tunisia: history and control strategy.

Forest fire is a major factor of degradation of Tunisian forests. It has destroyed important areas since the beginning of the last Century. Statistical data show that the forests of the Aleppo pine are the most affected by fires and the most threatened by this disaster. The great fires that occurred in Tunisia coincide with major historical events and climatic anomalies such as the Second World War and the great droughts of the twenties and forties. The distribution of fires from 1984 to 2009 by governorate shows that fires affect the steppes very little and attack mainly pine forests and maquis. Forest fires reach their peak in August. The causes of fires are, for the most part, unknown, however recklessness is the main cause of fires in forest areas. Tunisia has introduced a two-part fire-fighting policy, one involving the opening of firebreaks and trenches, the establishment of water points and the preparation of fire danger bulletins. In collaboration with the National Institute of Meteorology (INM) during the summer period and the other legislative to conserve forests by the promulgation of decrees of a preventive and repressive nature. The exploitation of the database of bulletins, shows that the frequency of days at severe forest fire weather is recorded during the month of June. During the month of July, almost all stations do not have zero-risk days, with the exception of the Bizerte station. The first posts vigies were created by the beylical decree of June 18, 1895 in kroumirie to ensure the surveillance of the oak forests. For the Aleppo pine forests, it is necessary to wait until the beginning of the 20 th Century to see the first installations. Fire trenches have varying widths, averaging 50 meters. They are not uprooted, for economic reasons. The first decree forbidding fire during the hot season with stubble and afforestation dates back to the reign of Bey Mohamed Es Sadok (1870). Legislation has evolved since then towards the conservation of burnt land by prohibiting grazing in natural, artificial or fire-related forests, whose trees of forest species are less than 2 meters high in the 1988 Forest Code.

Keywords : fire, Aleppo pine, post office, fuel break.

Introduction

Le feu de forêt est un fléau qui constitue le premier péril naturel responsable de la destruction des espaces boisés. Il détruit plus que toutes les autres calamités naturelles. Les forêts tunisiennes à l'instar des autres forêts méditerranéennes font partie d'un écosystème fragile et vulnérable aux feux de forêt. Les conditions climatiques qui règnent pendant la période estivale se caractérisent par un déficit hydrique, des vents secs et chauds (sirocco) et une activité humaine importante dans les interfaces forêt terrain agricole (travaux agricoles, moissons, plaisance, etc.).

Pour étudier l'historique des feux de forêt en Tunisie, nous avons exploité l'archive de la Direction Générale des Forêts disponible à l'Archive Nationale qui fournit des informations sur les feux de forêt remontant à l'année 1884. Nous avons dépouillé aussi les registres de déclarations des incendies qui enregistrent les feux de forêts depuis 1939. Ces registres disposent d'une base de données régulière avec les dates, l'heure de déclaration des sinistres, la surface incendiée, la cause de l'incendie, la description du combustible, les dommages causés et le nom de l'auteur (s'il est connu). Des données plus récentes nous ont été fournies par le service de la conservation des forêts contre les feux de forêt de la Direction Générale des Forêts qui dispose d'une base de données numérique qui remonte à l'année 1982.

Les premières études qui ont abordé le sujet de feu de forêt en Tunisie remontent aux années quarante par Boudy (1948). L'auteur indique que les forêts d'essences résineuses principalement de pin d'Alep sont les plus exposées aux ravages du feu et heureusement la régénération des futaies du pin d'Alep s'opère avec une facilité surprenante. Il a présenté un relevé des incendies de forêt en Tunisie depuis 1903 jusqu'à 1945. Il a expliqué l'ampleur du phénomène du feu de forêt en Algérie par rapport à la Tunisie malgré les ressemblances du milieu physique par l'absence de forêts communales en Tunisie et l'existence de vastes zones de communaux représentant un stade dégradé de la forêt climacique qui échappent au contrôle de l'administration. Boudy (1952) a considéré que la majorité des incendies «*procède de l'insouciance ou de la cupidité des populations en quête de parcours plus étendus et plus riches*». Concernant la répartition des incendies, la région forestière du nord occupé par la subéraie est plus épargnée par le feu que celle du haut tell et la Dorsale. Dans cette étude, il a traité aussi les dommages causés par les incendies, les méthodes d'évaluation du dommage les mesures législatives, administratives et techniques de la défense contre les incendies. Abdelmoula (2001) a essayé de déterminer les principaux paramètres caractérisant finement le combustible de trois espèces arbustives dominantes qui constituent le sous bois de la forêt de pin d'Alep de Jebel Mansour à savoir

Rosmarinus officinalis, *Pistacia lentiscus* et *Erica multiflora*. Cette caractérisation fine de la phytomasse aérienne des espèces arbustives est importante pour connaître le comportement de ces espèces vis-à-vis du feu. Il a étudié la dynamique de ces espèces arbustives dans les tranchées pare-feu suite à des anciens débroussailllements. L'étude de l'impact du débroussaillage dans les tranchées pare feu confirme que la technique du dessouchage manuel augmente temporairement la richesse floristique mais elle a des effets néfastes sur le sol car elle l'expose à l'érosion hydrique. Bouafif (2003) a exploité une série d'imagerie satellitaire des zones incendiées à Chenenfa et BouKornine pour analyser qualitativement les changements qui ont eu lieu au niveau de la structure du paysage depuis le jour de l'incendie. Il a analysé les résultats issus de la segmentation des images NDVI et a dégagé la répartition spatiale des différentes classes de reprise de végétation à l'intérieur de la zone incendiée. Mezned (2003) a étudié la dynamique de la végétation dans la forêt de Oum Laboueb (Jebel Fkirin) dominée par les peuplements de pin d'Alep à partir de traitement d'images multi dates à savoir : quelques jours avant l'incendie, après 8 ans à un stade où la végétation s'est régénérée en grande partie et après 13 ans. Les prospections du terrain et l'analyse spectrale ont montré le potentiel des images pour définir les classes d'occupation du sol à l'aide de la classification dirigées des images acquises avant et après l'incendie. L'analyse multivariée par composantes principales (ACP) a permis de diagnostiquer les relations existantes entre l'information structurale liée à la végétation, la topographie du milieu, l'information spectrale et le degré d'inflammabilité des formations végétales. Abdelmoula (2005) a étudié les relations entre le risque d'incendie, les activités humaines et les infrastructures de défense des forêts contre les incendies. Il a évalué les prélèvements en bois énergie et le pâturage et son influence sur le risque d'incendie. Il a considéré que la présence humaine dans le massif forestier de Jebel Mansour a des effets bénéfiques sur la protection de la forêt. Il considéré que les ouvrages de défense des forêts contre l'incendie sont globalement bons et ne remettent pas en cause le dispositif existant. Guidara (2006) a examiné le potentiel de la télédétection de haute et très haute résolution

spatiale couplé à l'analyse spatiale dans l'évaluation du risque au feu des formations de pin d'Alep. Elle a appliqué un modèle de calcul de vulnérabilité basé sur l'inflammabilité et la combustibilité des formations forestières et sur leur prépondérance dans les différentes strates. Sebei (2017) a abordé dans sa thèse les facteurs de risque d'incendie dans la forêt domaniale de Takrouna, dominée par des peuplements de pin d'Alep mixte et pure qui se trouvent à la limite entre le bioclimat subhumide et le semi-aride supérieur. Il a adopté deux méthodes pour l'évaluation du risque d'incendie, une méthode indiciaire et une méthode semi empirique basée sur le modèle de simulation de feu de forêt Behave. La vitesse maximale simulée par le modèle Behave dans la forêt de Takrouna a atteint 5,2 km/h et la hauteur maximale des flammes s'élève à 7,30 mètres. De telles valeurs sont comparables à des feux réels survenus dans des forêts de la rive nord du bassin méditerranéen. Il a indiqué que les secteurs incendiés se régénèrent naturellement et la régénération est même très active. Il a noté que les intervalles entre les grands incendies restent jusqu'à présent tolérables dans la forêt de Takrouna favorisant ainsi la régénération naturelle. Mais il faut toujours assurer une bonne surveillance et exercer les traitements sylvicoles dans des délais acceptables pour les jeunes peuplements puisqu'une répétition de l'incendie sur le même territoire peut détruire irrémédiablement le peuplement et rendre la régénération impossible lorsque les sujets de pin d'Alep n'atteignent pas encore l'âge de maturité.

1. Evolution des incendies de forêt en Tunisie

La surface boisée détruite par le feu entre 1902 et 2016 est de 400760 ha. La moyenne des surfaces incendiées a atteint 3484 ha/an (fig.1). Cette moyenne est variable entre la première et la seconde moitié du vingtième siècle. Gammar (1999 -2006) a fait un inventaire des incendies de forêt en Tunisie. Il a cité les récits des voyageurs européens comme celui de Peyssonnel, le 11 juillet 1724 ; ce dernier a noté des incendies nombreux dans les broussailles des friches et des pentes sur son trajet entre Tunis et Zaghouan, à travers l'extrémité Nord de la

Dorsale. Le prince Allemand Pukler – Muscan (1836) signale en Août 1835 plusieurs incendies de forêts affectant les broussailles denses des reliefs de la partie Nord du Haut tell. Il remarque que ces incendies avaient pour but de protéger les troupeaux d'animaux domestiques des lions et des autres bêtes sauvages habitant ces formations embroussaillées ».

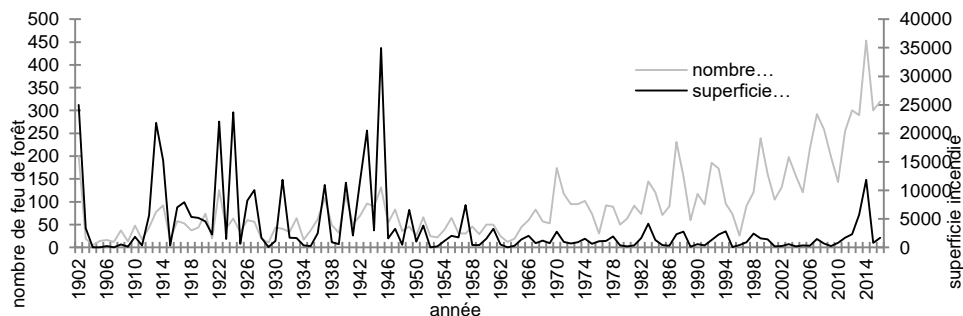


Figure1. Évolution des superficies incendiées et des nombres d'incendie en Tunisie (1902-2016)

Gammar (2006) a réparti l'histoire des incendies de forêt en Tunisie en trois périodes :

La première période du XX^e siècle : cette période est caractérisée par la limitation des surfaces incendiées et de ce fait elle garde la même tendance remarquée par les premiers forestiers du protectorat durant la fin du XIX^e siècle.

La deuxième période de 1913 à 1950 : cette période a connu les événements d'incendies de forêt les plus spectaculaires, la moyenne de cette période a atteint 6200 ha/an, cette moyenne représente presque le double de la moyenne de la fin du XIX^e et le début du XX^e siècle. Elle cache l'ampleur des surfaces incendiées pendant les années les plus désastreuses ; 21846 ha en 1913, 22061 en 1922, 23674 en 1924. L'année 1945 a connu la surface incendiée la plus importante enregistrée dans les archives disponibles de la Direction Générale des Forêts : elle a atteint 34995 ha. Le nombre des feux enregistré est de 131 soit une moyenne de 267 ha/ incendie.

La troisième période de 1950 – 2010 : la moyenne des surfaces incendiées pendant cette période chute à 1350ha par an. Gammar (2006) explique cette diminution par le changement important dans les statuts des terres forestières de la Tunisie.

Néanmoins, les deux dernières décennies du XX^e siècle ont connu une augmentation remarquable des surfaces incendiées. La surface parcourue par le feu a atteint 4139 ha en 1983 et 2759 ha en 1988. La première moitié des années 90 était exceptionnelle, vu la surface ravagée par le feu et la recrudescence des grands incendies. L'augmentation des surfaces incendiées pendant la période de 1912 à 1945 est accompagnée par une extension des terrains cultivés aux dépens des terrains boisés ou broussailleux. Le défrichement qui a été limité aux régions proches de Tunis, pendant les premières années de protectorat, s'accélère et se généralise à l'ensemble de la Tunisie du Nord essentiellement à partir de 1920.

Les grands incendies qu'a connus la Tunisie coïncident avec les grands événements historiques. Pendant la Deuxième Guerre Mondiale, la Tunisie a enregistré les superficies les plus importantes d'incendie : 34995 ha en 1945. Les incendies mais aussi les grandes sécheresses ont ravagé des superficies importantes, surtout pendant les années vingt et les années quarante. La dernière période de l'évolution des incendies qui débute surtout après 1958 est marquée par la baisse des superficies incendiées et l'importance des nombres d'éclosion (fig. 1).

Gammar(2006) explique cette nouvelle tendance par l'atténuation relative des tensions autour des terres forestières. En contrepartie il y a un renforcement de la réglementation forestière, la multiplication des chantiers forestiers et la résolution des problèmes d'immatriculation des terrains forestiers. De telles mesures ont contribué en partie à la réduction des incendies dus à la malveillance et au défrichement. Nous signalons aussi une diminution remarquable des grands incendies pendant les dernières décennies en comparaison surtout avec la fin du XIX^e siècle et la première moitié du XX^e siècle.

En 1922 sur une surface totale incendiée atteignant 22061 ha, une bonne partie se trouve dans les forêts de pin d'Alep. Le rapport du Gaid du Kef sur cet événement raconte que de grands incendies ont survécu cette année et ont détruit des milliers d'hectares et des millions d'arbres d'essences forestières dans son Gaïdat surtout au Cheikhat de Srâa, territoire d'Ourgha. L'étendue dévastée par le feu était de 12000 ha. Dans le même secteur de Ourgha et en 1943 les incendies ont ravagé une surface de 8000 ha sur un total de 20497ha à l'échelle nationale. L'inspecteur principal des forêts, dans son rapport sur les incendies de 1943, a indiqué que le Cheikhet de Sraa (Ourgha) s'est distingué pendant cette année par plusieurs incendies allumés par les tirs d'avions d'exercice alliés.

Après l'indépendance, il y a eu une baisse nette des surfaces incendiées passant de 4500 ha pendant les années quarante à 1500 ha dans les cas extrêmes vers la fin des années cinquante. Cependant, on a remarqué une reprise pendant les années quatre vingt et quatre vingt dix durant lesquelles les surfaces touchées par les feux de forêts ont atteint 2000 ha. Gammar (2006) indique que les grands incendies des années quatre vingt et quatre vingt dix tirent leur gravité des conséquences de la réussite des efforts de protection et de restauration.

2. Répartition spatiale des surfaces incendiées

La répartition des incendies de 1984 - 2009 par gouvernorat montre que les incendies affectent très peu les steppes et s'attaquent essentiellement aux pinèdes et maquis (fig.2).

La surface incendiée a atteint durant cette période 31752 ha, dont 15049 ha sont des peuplements de pin d'Alep soit 47,3% des surfaces incendiées. Les maquis occupent la deuxième position avec 18% des surfaces incendiés, la troisième position revient aux chênes avec 13,4% (fig.2).

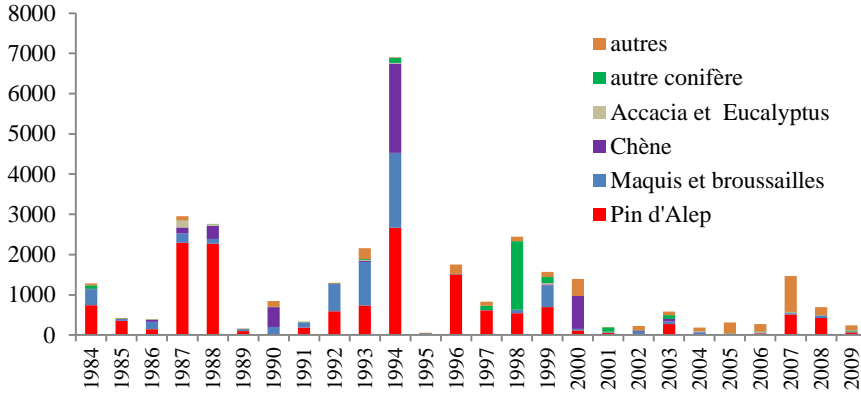
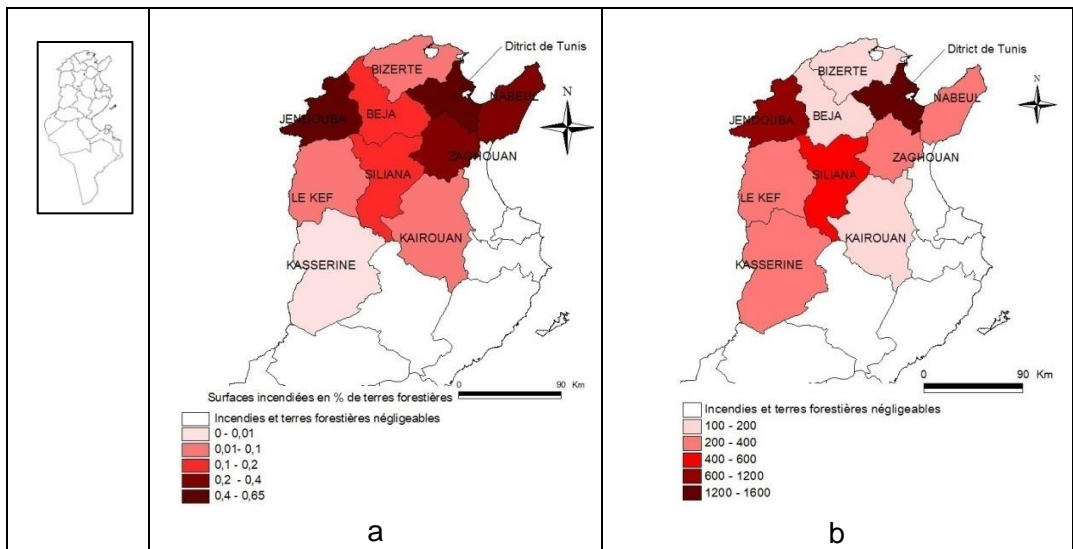


Figure 2. Evolution des surfaces incendiées par type de peuplement (1984-2009).

Le gouvernorat de Jendouba et le plus affecté par les feux de forêt de point de vue surfaces incendiées en pourcentage de terres forestières. En seconde position en trouve le district de Tunis (Manouba, Ariana, Ben Arous, Tunis), ce secteur connaît le nombre d'éclousions le plus important à l'échelle nationale (fig,3 a et b).



3. Les régimes et causes des feux de forêt en Tunisie

3.1. Régimes des feux

Le mois d'août est le mois le plus fréquent dans le déclenchement du feu durant la période (1939- 2009), vient en seconde position, le mois de juillet. Le danger du feu de forêts s'aggrave du mois de mai au mois de septembre, car c'est pendant cette période que nous enregistrons les valeurs hygrométriques minima de l'année (fig.4).

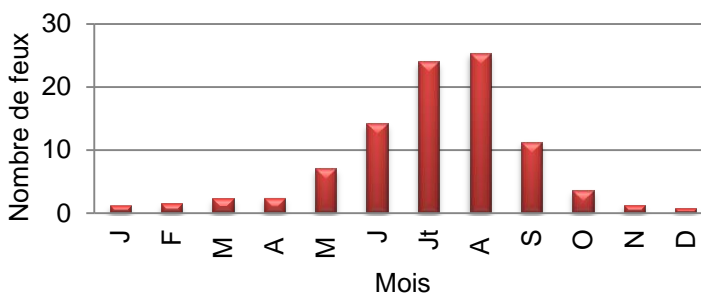


Figure 4. Nombre mensuel des feux de forêt durant la période 1939-2009.

Même la période hivernale a connu des incendies, mais leur surface reste réduite. Les archives indiquent qu'à la date du 25 janvier 1947, un incendie a détruit 120 ha dans le secteur de Djebel Ain Essid (gouvernorat de Zaghouan) ; un autre incendie moins important a ravagé 32 ha dans la forêt d'Ouled Ali (Kroumirie) le 21 janvier 1941.

Les feux de forêts atteignent leur paroxysme vers 13 h, cette heure cumule 10,7% des éclosions des incendies entre 1982 et 2009 (fig.5). La tranche horaire allant de 10 h à 18 h connaît la fréquence la plus importante des éclosions de feux de forêt, soit 70,7%. Nous signalons aussi que 20% des incendies ont éclaté dans la tranche horaire de 19.00 h à 00.00 h.

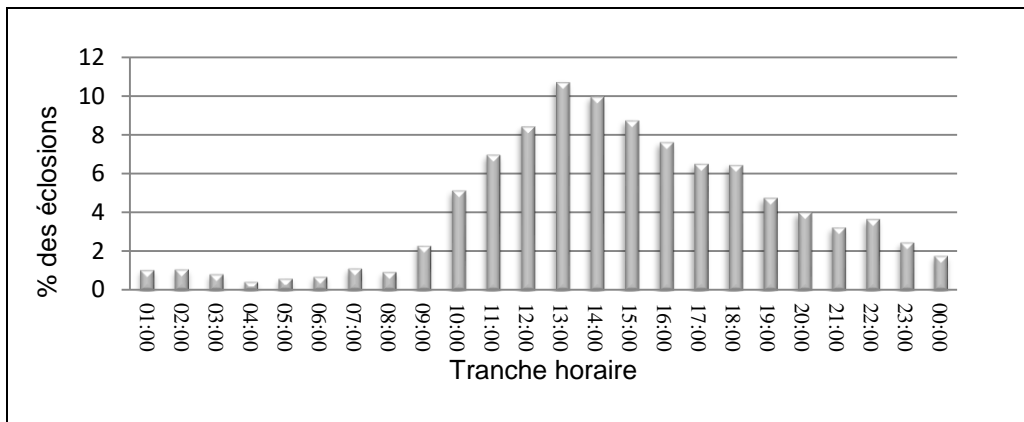


Figure 5. Pourcentage des éclosions des feux de forêt par tranche horaire en Tunisie pendant la période 1982-2009.

L'horaire de ces incendies pose plusieurs interrogations sur les causes de ces incendies qui éclatent le soir quand les températures et l'état hygrométrique de l'air sont moins favorables aux éclosions, ce qui laisse penser plutôt à des actes criminels comme principale cause de déclenchement de ces feux. Certains incendies enregistrés pendant cette tranche horaire, peuvent être aussi causés par des reprises de feux antérieurs.

3.2. Causes des incendies de forêt en Tunisie

3.2.1. Les causes naturelles

L'unique cause naturelle des feux de forêt du bassin méditerranéen est la foudre. Ce phénomène fréquent en forêt boréale est relativement rare en région méditerranéenne seulement 1 à 5% des incendies. En Tunisie, la foudre est responsable de 1,3% des éclosions des feux de forêts. Les surfaces incendiées à cause de ce phénomène sont très limitées. La surface la plus importante inventoriée dans les archives disponibles est de 5 ha dans une forêt de pin d'Alep au cours de l'incendie du 14 septembre 2004 à Gboulat, gouvernorat de Béja.

3.2.2. Les causes humaines des éclosions des feux de forêts

L'imprudence est la cause principale des feux de forêts. En Tunisie, elle représente 46 % du total des incendies. Les imprudences résultent de la négligence par rapport aux risques d'incendie, et sont corrélées à la fréquentation des forêts et leurs abords (randonneurs, chasseurs, cueilleurs...). Les éclosions dues à la malveillance occupent la seconde position, elles représentent 13,8% des éclosions des feux de forêts en Tunisie. Nous remarquons une baisse nette des incendies causés par le charbonnage (7,8%) qui a connu un essor remarquable pendant les années cinquante et les années soixante dix. Les accidents sont aussi responsables avec une part importante, on peut citer les étincelles d'échappement qui proviennent des engins agricoles (tracteurs, moissonneuses batteuses) et des étincelles provenant des tronçonneuses utilisées dans les travaux d'éclaircie et d'exploitation dans les forêts. D'autres sont causés par les lignes de voies ferrées. Il y a des accidents dus à des défauts de fonctionnement liés aux lignes électriques qui peuvent s'aggraver lorsque les lignes sont agitées par le vent entraînant l'apparition d'arcs électriques qui enflamment la végétation. Les accidents liés aux dépôts d'ordures représentent 1.7% des causes d'éclosion. Ils apparaissent lorsque les dépôts sont mal contrôlés ou bien lorsque les dépôts clandestins sont nombreux. Les actes militaires sont derrière l'éclosion de plusieurs incendies. Pendant l'année 1960, 42 incendies ont été recensés ; 15 d'entre eux étaient causés par des actions militaires : par des explosions d'engins de guerre ou de bombes incendiaires et même de bombes au napalm lancées par l'armée française le long de la frontière entre la Tunisie et l'Algérie pendant la guerre de libération de l'Algérie qui s'est déroulée de 1954 à 1962. D'autres incendies sont causés par des champs de tir militaires. Depuis 2012 de nombreux incendies ont éclaté dans les forêts de l'ouest du pays causés par l'intervention militaire dans le cadre de la lutte contre le terrorisme. En 2014, dans certaines zones militaires du gouvernorat du Kef et Kasserine, des incendies exceptionnels ont détruit 6460 ha de forêts de pin d'Alep.

L'exploitation de l'archive des incendies de forêt en Tunisie montre une nette augmentation des éclosions d'incendies aux causes inconnues, malgré le progrès des moyens techniques d'investigation du terrain et de télécommunication (fig.6).

Dans les pays de la rive nord de la méditerranée, les services de conservation des forêts contre les incendies ont constitué des brigades d'investigation des feux de forêts en utilisant la méthode des évidences physiques. Les investigateurs analysent la géométrie du périmètre de la surface brûlée et les indicateurs laissés sur les pierres, la végétation, les troncs, etc. Ils permettent l'établissement des vecteurs de direction et sens de progression du feu. Avec cette méthode, ils prétendent réduire le pourcentage des causes inconnues.

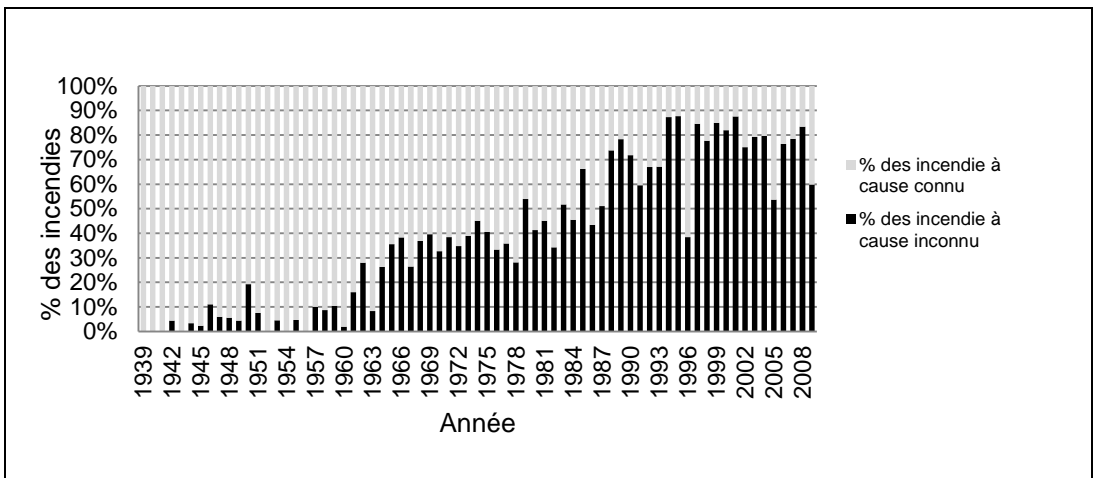
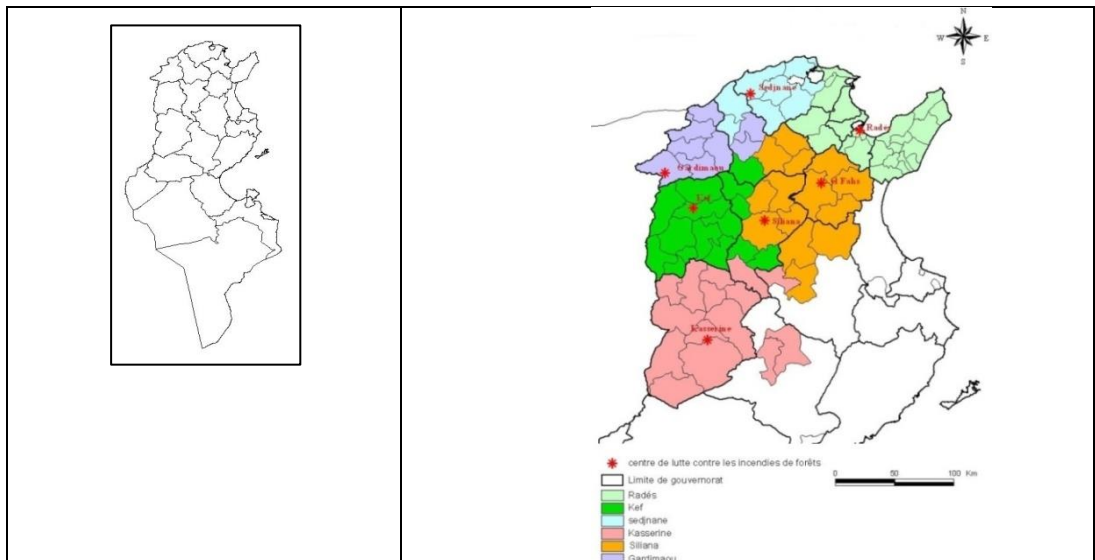


Figure 6. Evolution du pourcentage des incendies à causes connues et inconnues durant la période 1939-2009.

4. Les centres de protection des forêts, les postes vigies et les moyens de prévision des incendies

4.1. Les centres de protection

Le choix des sites pour l'installation des centres de protection des forêts et des équipements de lutte a été marqué durant les décennies 1970 et 1980 par deux Tendances. La première durant les années soixante-dix, les centres ont été créés dans les chefs-lieux des gouvernorats en l'occurrence : Radès pour l'administration centrale, Kasserine et le Kef pour les régions de l'Ouest de la Tunisie. La deuxième tendance durant les années quatre-vingt. Les centres ont été installés dans les délégations à vocation plus ou moins forestière à savoir : Sejnane pour le gouvernorat de Bizerte, Fahs pour le gouvernorat de Zaghouan et plus récemment Ghardimaou pour le gouvernorat de Jendouba (fig.7).



4.2. Les postes vigies

Les postes vigies jouent un rôle capital dans la défense contre les incendies, en les décelant dès l'origine et permettent aux secours d'arriver rapidement, condition essentielle de toute lutte efficace contre le feu (Boudy, 1952).

Le projet de décret portant organisation d'un service de surveillance en vue de prévenir les incendies dans les régions boisées du nord de la régence, remonte au 17 mars 1893. Ce décret indique que « *les populations indigènes dans les régions forestières du nord de la régence, cercle militaire d'Ain Draham, contrôle civil de Souk el Arba de Béja et de Bizerte, étaient astreintes pendant la période du 15 juillet au 15 octobre de chaque année, à un service spécial des postes-vigies. Ce décret propose de profiter des listes de la Mejba de l'année en cours pour la désignation des hommes astreints au service de surveillance* » (Archives Nationales, 1888-1896). L'installation des postes-vigies a été proposée en 1893 pour concourir à la surveillance des forêts pendant la saison des incendies, leur nombre figure dans le tableau 1.

Tableau 1 : Postes vigies installés en Tunisie à la fin du XIX^e siècle. (Archives nationales, 1888-1896).

	Nombre de postes	Nombre d'hommes à pied/ jour
Cercle militaire d'Ain Draham	29	60
Contrôle Civil de Bizerte	7	14
Contrôle Civil de Souk el Arba	12	28
Contrôle civil de Béja	13	26

Les premiers postes vigies ont été créés par le décret beylical du 18 juin 1895 un service spécial pour la surveillance des massifs forestiers contre les délits de défrichement et les incendies, a vu le jour (Mejbri, 2004). Les forêts du Haut Tell ne figurent pas dans la liste des forêts à équiper par ces postes vigies pendant cette période, il faut attendre le début du 20^{ème} siècle pour voir les premières installations. La figure 8 schématise l'implantation des postes vigies

actuels. La densité de ces postes diffère selon l'importance des enjeux : peuplement de valeur économique, écologique ou patrimonial importante, proximité des grandes agglomérations, etc.

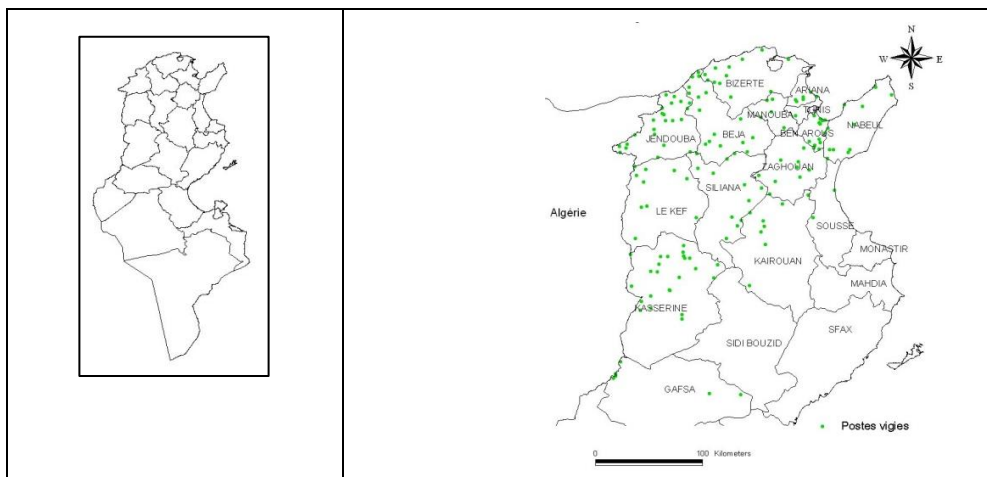


Figure 8. Postes vigies forestiers dans la Tunisie du nord.

4.3. Le Degré Météorologique du Risque Incendie de Forêt (DMRIF) méthode d'évaluation du risque d'incendie en Tunisie

Après des recherches menées sur la relation entre les paramètres météorologiques et les feux de forêts déclarés ainsi que le comportement de ces paramètres envers les incendies déjà déclenchés. Arif (1992) a proposé une méthode inspirée de l'indice Orioux. Les paramètres choisis pour le DMRIF local sont : la réserve en eau du sol, la vitesse moyenne du vent, la température maximale de l'air sous abri, la quantité de la dernière pluie et le nombre de jours sans pluie depuis la dernière pluie. La détermination des équations de régression est basée sur la résolution matricielle, il en résulte que la réserve en eau du sol est le paramètre principal pour la détermination du DMRIF.

Cette méthode est adoptée pour élaborer le bulletin météorologique spécial risque incendie de forêts à l'INM (Institut National de Météorologie) et diffusé quotidiennement depuis l'été 1989, sous la demande de la Direction Générale des Forêts du 1^{er} mai au 31 octobre aux organismes suivants : Direction générale

des Forêts, Direction de protection civile, les subdivisions météorologiques (Bizerte, Jendouba, Sousse, Sfax et Tozeur), les centres météorologiques régionaux de télécommunications (Bizerte, Monastir, Djerba et Tozeur).

L'exploitation de la base de données de ces bulletins, montre que la fréquence des jours à degré météorologique risque incendie de forêt sévère est enregistré pendant le mois de juin. Au cours du mois de juillet, la quasi-totalité des stations ne présentent pas de jours à niveau de risque nul, à l'exception de la station de Bizerte (fig. 9). Au cours du mois de juillet, les jours à niveau de risque assez sévère du DMRIF occupent la première position avec des fréquences importantes surtout dans les stations continentales. Le mois d'août reste encore le mois qui présente la fréquence la plus importante des jours de niveau de risque sévère du DMRIF dans les stations de Kasserine et Jendouba. La fréquence de jours à niveau de risque nul reste très faible mais elle intéresse plus de stations en comparaison avec le mois de juillet. Le mois de septembre présente la fréquence la moins forte des jours à « degrés météorologiques risque incendie de forêt » sévère et assez sévère dans toutes les stations synoptiques de la Tunisie. La faiblesse de la fréquence des jours à risque sévère et assez sévère s'explique surtout par le début de la saison pluvieuse qui débute en général pendant la deuxième moitié du mois d'août avec une variabilité interannuelle. La pluie est un paramètre déterminant dans le calcul du DMRIF.

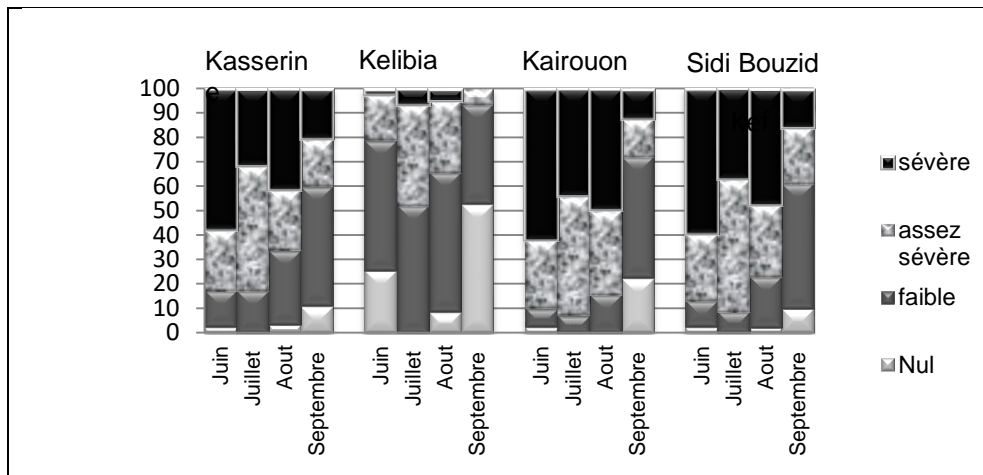


Figure 9. Fréquence moyenne des jours à risque de feu de végétation en %. La Direction Générale des Forêts a dressé aussi des diagrammes de détection et d’alerte à l’échelle locale, régionale et nationale et des diagrammes de processus opérationnel pour les différents niveaux de gravité des incendies.

5. Mesures techniques et législatives de défense contre les incendies

5.1. Mesures techniques

Les ouvrages et les travaux de protection des forêts contre les incendies ont été établis depuis la fin du XIX^e siècle, après la création du service forestier en 1883. Dans les forêts des Kroumires, il a été ouvert jusqu’à 1932 des tranchées limites et des tranchées divisionnaires d’une longueur évaluée à 320 km, soit l’extraction de 2400 ha de forêts (Mejbri, 2004).

Pendant les années quarante, Boudy (1952) considère qu’il y a 2300 km de tranchées de protection. Ces tranchées sont établies sur les crêtes et le long des chemins. Elles présentent une largeur de 30 mètres, lorsqu’elles indiquent le périmètre des forêts et les limites des séries, de 20 mètres dans les autres cas. La broussaille et les jeunes sujets sont recépés sur « *les largeurs qui viennent d’être indiquées et le milieu en est fixé par un essartement complet de 3 mètres de large sur lequel on fait disparaître tous les sujets. Cet essartement contient,*

toutes les fois qu'il est possible, un sentier suffisant pour le passage d'un cavalier » (Direction des Forêts ,1889).

Les tranchées pare- feu ont des largeurs variables, en moyenne 50 mètres. Elles ne sont pas dessouchées, pour des raisons économiques ; on se contente d'y recéper les arbres et le sous bois, ce qui réduit notablement leur efficacité.

La Direction des Forêts a aménagé des sentiers d'une largeur d'1 mètre pour faciliter les travaux d'exploitations forestières et rapprocher les foyers d'habitations. Elle a créé jusqu'à 1932, un réseau de sentiers forestiers évalué à 2630 km (Mejbri, 2004).

Actuellement l'infrastructure de défense contre les incendies de forêts comprend 8900 km de pistes, 7300 km de tranchées pare-feu et 370 points d'eau selon DGF (2011).

5.2. Mesures législatives de défense contre les incendies de forêts

Il y a des mesures préventives comme l'interdiction d'allumer le feu en forêt en été, d'autres sont répressives telles que les infractions aux dispositions sur les mises à feu. Ces mesures remontent au 19^e siècle. Bien que le gouvernement des Beys fût généralement peu préoccupé de la conservation des forêts, un certain nombre de mesures avaient été prises, surtout sous le règne d'Ahmed Bey.

Un décret de Châaban 1258 (novembre 1842) « *nomma Mohamed ben Ayad Oukil de Tabarka en le chargeant de l'exploitation du bois de la Kroumirie et de la garde du massif montagneux qui s'étend à l'Ouest de la province le long de la frontière algérienne. Cette mission fut peu de temps après convertie en fermage qui lui donnait le droit d'exploiter les bois, à condition de ne pas porter atteinte à la conservation de la forêt »* (Direction des forêts, 1889).

Un décret du Bey Mohamed Es Sadok, qui date du 13 Safar 1287 (14 mai 1870), défend de mettre le feu pendant la saison chaude aux chaumes et aux boisements situés sur les montagnes et déclare la responsabilité collective des populations.

Le décret du 20 el Kada 1303 (20 août 1886) reproduit une grande partie des dispositions de la loi du 17 juillet 1874 en Algérie et complète le décret de Safar 1287. Il défend même au propriétaire, « *d'allumer du feu à l'intérieur et à moins de 200 mètres des bois et forêts, et oblige tous ceux qui en sont légalement requis à prêter leur concours pour combattre l'incendie. Il interdit le pâturage pendant six ans dans les forêts incendiées, et édicte pour la punition des contraventions des amendes variant de 32 à 800 piastres et un emprisonnement facultatif de six jours à six mois* » (Direction des Forêts, 1889). Ces différents décrets sont surtout des mesures de prévention. Celui du 15 Chawel 1305 (24 juin 1888) est un décret de répression, il « punit les auteurs d'incendie volontaire de la peine de mort si l'incendie a causé la mort d'homme, de la peine de travaux forcés à perpétuité. Il déclare incendie volontaire celui qui est commis par malveillance, vengeance ou intention de nuire ou de créer des pâturages » (Direction des Forêts, 1889).

Le journal officiel de 1899 renferme plusieurs articles dans ce sens, on cite l'article 13 qui déclare que « *pendant la période du 1^{er} mai au 1^{er} novembre, sauf autorisation spéciale, il est interdit aux adjudicataires ou aux bénéficiaires de marchés de gré à gré, à leur ouvriers et employés d'allumer le feu à l'intérieur ou à la distance de 200 mètres des bois et forêts, si ce n'est dans les conditions prescrites par le cahier des charges, sous les peines portées à l'article 5 du décret beylical du 20 août 1886 et à l'article 10 du présent décret.*

Les adjudicataires demeureront responsables de tous dommages causés à la forêt en cas d'incendie provenant de leur fait ou de celui de leurs ouvriers, même si les précautions prescrites par le cahier des charges avaient été prises. » (Direction des Forêts, 1889).

Dans le journal officiel du 29 juillet 1903, le décret beylical étend la période d'interdiction de mise à feu dans les zones boisées du 1^{er} mai au 15 novembre inclus. Ceux qui mettaient le feu devront, au moins huit jours à l'avance, prévenir les propriétaires ou occupants riverains ainsi que l'autorité administrative locale. Le décret beylical de 1903 a mentionné dans l'article 9 l'interdiction du parcours pendant un délai de six ans dans les forêts incendiées.

Dans le Code Forestier de 1988 promulgué par la loi n° 88-20 du 13 avril, il n'y a pas une grande réforme concernant l'article qui interdit la mise à feu à l'intérieur de la forêt, seulement, la période d'interdiction est limitée par rapport au décret beylical de 1903 du 1^{er} mai au 31 octobre.

Le code forestier de 1988 interdit le pacage dans les forêts naturelles, artificielles ou issues d'incendie, dont les arbres d'essences forestières ont moins de 2 mètres de hauteur.

L'article 91 signale que *« les propriétaires d'animaux trouvés le jour du délit dans les forêts issues d'incendie ayant moins de 2 mètres de hauteur, seront condamnés à une amende de 14 dinars par camélidé ou caprin et 8 dinars par animal d'autre espèce. Il pourra en outre être prononcé contre le berger, un emprisonnement de 4 à 30 jours »* (Code forestier, 1988).

En cas de récidive, ou si le délit a été commis la nuit, la peine de prison sera obligatoirement prononcée et les animaux pourront être confisqués.

L'article 65 mentionne qu' *« exceptionnellement, en cas d'événement calamiteux, le ministre de l'agriculture pourra autoriser le pacage des animaux (ovins, caprins, bovins et équidés) dans les forêts naturelles ou issues d'incendie dont les arbres d'essences forestières ont moins de 2 mètres de hauteur. Toutefois, ce pacage reste interdit dans les périmètres où les arbres d'essence forestière plantés ou semés de main d'homme ou issus d'incendies ne dépassant pas un mètre de hauteur. Une liste de bénéficiaires d'autorisation de pacage sera établie par une commission dont la composition est fixée par décret qui précisera en outre le montant de la redevance de pacage qui doit être payée par ces bénéficiaires »* (code forestier, 1988).

Dans la pratique, les délits sont nombreux dans les forêts frontalières et surtout dans les zones récemment incendiées qui présentent des parcours préférables pour les pasteurs et surtout pendant les années de sécheresse.

Conclusion

L'étude des statistiques de feux de forêt en Tunisie a montré que malgré la diminution des surfaces incendiées, le nombre des éclosions a connu une nette recrudescence, depuis le début du siècle dernier. Les efforts des services qui veillent à la préservation et à l'amélioration du couvert forestier ont été orientés vers le développement des textes législatifs qui réglementent la relation entre les services forestiers et les usagers. La colonisation a transformé la situation de la forêt de domaine public qui répond aux besoins de la population locale en une forêt domaniale qui répond aux besoins de la colonisation française. L'Etat de l'Indépendance n'a pas beaucoup amélioré ces textes, c'est pourquoi les tensions persistent entre les usagers et la Direction Générale des Forêts. Les mesures techniques prises pour réduire les risques d'incendies restent encore loin des normes méditerranéennes. En effet, les pistes de défense des forêts contre les incendies de forêt nécessitent une extension, les postes vigies ne couvrent pas toutes les surfaces boisées et il est conseillé de multiplier ces postes en profitant des nouvelles technologies de télécommunication, les tranchées pare-feu doivent être entretenues et nettoyées périodiquement, la coordination entre les différents organismes responsables de l'extinction des incendies est insuffisante et doit être renforcée. Par ailleurs, les différentes mesures de défense contre les incendies de forêts doivent être précédées par une étude approfondie du risque, des secteurs les plus vulnérables au feu et des zones prioritaires.

Références bibliographiques

- Abdelmoula, K., 2005- *Evaluations de l'efficacité de réseaux de coupures de combustible sur la réduction du risque d'incendie à l'échelle du massif forestier*. Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur en science université de Provence, Aix-Marseille, 199p.
- Arif, A., 1992- La prévision du degré météorologique risque incendie de forêt (DMRIF) en Tunisie (Modèle local d'évaluation du DMRIF). INM.
- Arif, A., 1992- La prévision du degré météorologique risque incendie de forêt (DMRIF) en Tunisie (Modèle local d'évaluation du DMRIF). INM.

- Bouafif H., 2003- Suivi et évaluation de la dynamique de régénération post-incendie par analyse diachronique des données de télédétection et d'analyse spatiale : cas des zones incendiées de Boukornine et de la série forestière de Chenanfa-faroua (Zaghouan). Mémoire de master. 90p + annexes. Institut national Agronomique de Tunisie.
- Boudy, P., 1948- Economie forestière Nord Africaine. Tome IV- Paris, Ed. La Rose, 483p.
- Boudy, P., 1952- Guide du forestier en Afrique du Nord. La maison Rustique. Paris. 505p.
- Direction des Forêts., 1889- Notice sur les forêts de la Tunisie. Catalogue raisonné ; des collections exposées par le service des forêts.
- Direction Générale des Forêts., 1998- Plan d'action de défense de la forêt contre les incendies. 175 pp.
- FAO., 2001- Protection des forêts contre l'incendie. Cahier FAO conservation n° 36, Rome.
- Gammar, O., 1984- Défrichements et déprise rurale dans le Haut Tell Friguien. Revue Tunisienne de Géographie N°13, pp : 53-76.
- Gammar A. M., 1999- Evolution des incendies et de l'espace forestier en Tunisie depuis le XIXe siècle - Communication au Colloque " Les incendies des forêts méditerranéennes, prévention - extinction - érosion du sol - reforestation", Commission Nationale Hellénique pour l'UNESCO, Athènes, 8p.
- Gammar A. M., 2006- Inventaire et caractérisation des incendies de forêts et des espaces affectés en Tunisie – Communication au colloque «Les feux de forêt en Méditerranée: de nouvelles approches pour une problématique ancienne», Casa de Velázquez, Madrid, 15p.
- Guidara H., 2006- Exploitation de données de télédétection de haute et très haute résolution spatiale pour la caractérisation de la vulnérabilité des formations forestières aux incendies : cas du massif de Djebel Mansour. Mémoire mastère. 115 p + annexes. Institut national Agronomique de Tunisie.
- Imprimerie officielle de la république Tunisienne. (2007). Code forestier.
- Mahdhi S., 2004 -Exploitation des orthophotos et des systèmes d'information géographique dans la quantification et l'analyse spatiale de la régénération forestière post-incendie dans le massif de Boukornine. PFE. 68 p + annexes. Institut national Agronomique de Tunisie.
- Mejbri, N., 2005- Histoire de l'exploitation forestière en Kroumirie durant la période coloniale. Master. Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités de Manouba.
- Sebei, S., 2015- Le Degré Météorologique du Risque Incendie de Forêt (DMRIF) : méthode d'évaluation du risque d'incendie en Tunisie. XXVIIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège. Belgique.
- Sebei S., 2017- *Etude du risque d'incendie dans la forêt domaniale de Takrouna (saket sidi youssef)*. Thèse. 316p + annexes. Faculté des sciences Humaines et Sociales de Tunis.

CHAPITRE 13

Parcours et troupeaux dans l'aire du pin d'Alep

Abdelmajid El Hamrouni, Kaouther El Hamrouni-Aschi,
Ali El Khorchani et Rania Mechergui

*Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), B.P. 10, 2080 Ariana,
Université de Carthage, Tunisie*

Email: hamrouni.abdelmajid@gmail.com

Résumé. Une typologie des parcours forestiers dans l'aire du pin d'Alep est faite tout en donnant leurs principales espèces indicatrices. La capacité de charge de tels parcours est largement dépassée ; le taux de surpâturage a presque doublé en moins d'un demi-siècle, provoquant leur dégradation. Afin de freiner cette dégradation et améliorer la production fourragère, il y a eu recours au cactus inerme, *Atriplex nummularia*, *Acacia cyanophylla*, *Medicago arborea* et au semis d'herbacées. D'autres espèces aussi bien ligneuses qu'herbacées ont été recommandées. La typologie des troupeaux qui les pâturent a été également faite avec un aperçu sur leur mode de conduite, leurs besoins alimentaires, leur temps de séjour sur les parcours forestiers et leur productivité. S'il n'est pas possible de supprimer l'élevage en forêt, il est possible de l'organiser et de le développer en prenant en compte la végétation, l'animal et l'utilisateur forestier-éleveur.

Mots clés : Pin d'Alep, parcours forestiers, surpâturage.

Abstract. Rangelands and herds in the Aleppo pine area. A typology of forest rangelands in the Aleppo pine area is given while giving their main indicator species. The carrying capacity of such rangelands is largely exceeded; the rate of overgrazing almost doubled in less than half a century, causing their degradation. In order to curb this degradation and improve forage production, the Cactus *inerme*, *Atriplex nummularia*, *Acacia cyanophylla*, *Medicago arborea* and herbaceous plants were used. Other species, both woody and herbaceous, have been recommended. The typology of the herds that graze them was also discussed with an overview on their behavior, their dietary needs and their residence time on the forest rangelands and their productivity. If it is not possible to suppress livestock in the forest, it is possible to organize and develop it taking into account the vegetation, the animal and the forestry-livestock user.

Keywords: Aleppo pine, rangelands, overgrazing.

1. Introduction

Les forêts tunisiennes sont grevées de droits d'usage. L'un des plus importants de ces droits ancestraux, reconnus et règlementés par le code

forestier, est incontestablement celui de considérer les espaces forestiers pour les résidents de la forêt ou ses riverains, comme espaces pastoraux. Toutefois les aires protégées, les parties de la forêt mises en défens pour la régénération naturelle, celles incendiées ou reboisées datant de moins de sept ans y font exception.

Comment se présentent les parcours sous pin d'Alep dans toute son aire de répartition géographique, comment sont-ils gérés, leur production couvre-t-elle les besoins du cheptel qui les fréquente et dans le cas contraire quelles mesures sont prises pour assurer leur pérennité ? C'est ce que nous tenterons de traiter brièvement dans notre propos.

2. Les types de parcours

Les parcours forestiers dans l'aire du pin d'Alep, en pleine forêt ou dans ses stades de dégradation, sont constitués par les espèces du sous-bois. Ils sont concernés par une gamme d'ambiances bioclimatiques allant du subhumide à l'aride supérieur. Nous les désignerons par leur appartenance à ces ambiances. Les espèces indicatrices et les groupes écologiques de chaque zone bioclimatique facilitent leur reconnaissance et leurs limites (cf. partie phytosociologique et les feuilles IV et V de la carte phytoécologique de la Tunisie septentrionale). Pour chaque type, nous citerons quelques unes de ces espèces pastorales.

2.1. Les parcours du subhumide

Bien représentés dans les forêts de Sakiet Sidi Youssef et de Touiref, les parcours du sub- humide occupent ailleurs certains sommets de la dorsale (Bargou, Le Serj, Chambi, Zaghouan et le plateau de la Kessera). Néanmoins, certains de ces massifs, érigés en Parcs Nationaux, ne sont pas ouverts au pacage (Chambi, Le Serj, Zaghouan).

Les taches de pelouses d'altitude entre les pieds des xérophytes épineux en coussinet, recèlent de bonnes pastorales herbacées: *Medicago lupulina*, *Medicago murex*, *Trifolium subterraneum*, *Trifolium arvense*, *Trifolium phleoides*. *Brachypodium silvaticum*, *Cynosurus elegans*, *Poa bulbosa*, *Romulea bulbocodium*. Parmi les ligneux, *Colutea atlantica* est fréquent dans la région de Sakiet Sidi Youssef alors que des plantules de *Celtis australis* au Bargou sont raclées jusqu'au collet.

2.2. Les parcours du semi-aride supérieur

Situés en dessous des précédents tout en les circonscrivant, les parcours du semi-aride supérieur occupent un espace plus important. Selon l'altitude et la latitude où ils se trouvent, ils sont concernés soit par la variante hivernale fraîche soit par la tempérée.

Leurs principales espèces pastorales sont : *Lotus ornithodioides*, *Anthyllis vulneraria*, *Onobrychis argentea*, *Dactylis glomerata*, *Hedysarum pallidum*, *Medicago tunetana*, *Ebenus pinnata*, *Avena bromoides* parmi les herbacées. Les feuilles tendres de *Quercus ilex* sous les pins, *Retama sphaerocarpa*, *Olea europea*, *Cistus villosus*, *Calicotome villosa* subsp. *intermedia* attirent les petits ruminants dans les faciès de dégradation.

2.3. Les parcours du semi-aride inférieur

Les parcours du semi-aride inférieur sont situés entre l'altitude 600-800m., concernés par les mêmes variantes hivernales que les précédents, voire par la douce, entrent en contact avec les parcours de l'aride. Diverses espèces *Stipa grostis*, *Brachypodium distachium*, *Digitaria commutata* subsp. *nodosa*, *Hedysarum spinosissimum* et *Lotus cytisoides*... font partie de leurs pastorales herbacées. *Juniperus phoenicea*, *Olea europea*, *Ceratonia siliqua*, *Rhus tripartita*, *Genista cineria* subsp. *speciosa*, *Cistus clusii*, *Rhamnus lycioides*

subsp. *oleoides*, *Rosmarinus officinalis*, *Thymus hirtus* subsp. *algeriensis* comptent parmi leurs ligneux fourragers.

2.4. Les parcours de l'aride supérieur

Occupant la partie inférieure dans l'étagement altitudinal, intéressés par les hivers frais, tempérés et chauds, les parcours de l'aride supérieur se distinguent à côté du romarin et de la globulaire par la présence de *Stipa tenacissima*, *Stipa parviflora*, *Argyrolobium uniflorum*, espèces steppiques qui semblent remonter de plus en plus vers le Nord. Ajoutons aussi *Rhus tripartita*, *Periploca angustifolia*, *Echiochulon fruticosum*, *Plantago albicans*, *Plantago ovata*, *Artemisia Inculta* (=A. *herba alba*).

L'étagement altitudinal de ces parcours, conforme à celui des ambiances bioclimatiques, peut se schématiser de la manière suivante :

Au-delà de 1000m = parcours du subhumide.

800-1000m = parcours du semi-aride supérieur.

600-800m = parcours du semi-aride inférieur.

En-dessous de 600m = parcours de l'aride supérieur.

3. Production des parcours et durée de leur exploitation

La flore spontanée de la Tunisie compte 2160 espèces environ (Stratégie de la biodiversité, 1995), appartenant à divers genres et diverses familles. Très peu d'entre elles sont négligées par les troupeaux. Celles qui n'échappent pas à la dent du bétail sont classées par les pastoralistes en Poacées, Fabacées et diverses, qu'elles soient herbacées ou ligneuses.

A côté des spontanées, des espèces exotiques ont été introduites en Tunisie, vers la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècles, particulièrement du genre *Atriplex* et *Acacia*.

Toutes ces plantes n'ont d'intérêt pour les troupeaux que si elles sont *appétibles*, *digestibles* et *énergétiques*, assurant la couverture de leurs besoins d'entretien, de croissance et de production ainsi que leur couverture en éléments minéraux (cf. tableaux 1 et 2 en annexes à titre d'exemples).

Par ailleurs, les fortes ou faibles productions des parcours d'une région sont tributaires de sa pluviométrie. Des corrélations entre pluviométrie et production primaire ou secondaire ont été avancées pour les parcours naturels (Le Houérou, 1969 ; Novikoff, 1976 ; Floret *et al.*, 1978) ou pour les parcours forestiers (El Hamrouni, 1978 ; El Hamrouni et Khémiri, 1979 ; El Hamrouni, 1992). Dans ce contexte, concernant les parcours forestiers de la région de Kasserine tels que définis plus haut, aux valeurs moyennes de leur pluviométrie correspondent les valeurs moyennes de leur production, passant successivement selon les bioclimats de

- 270 UF/Ha au subhumide
- 180 UF/Ha au semi-aride supérieur
- 140 UF/Ha au semi-aride inférieur
- 120 UF/Ha à l'aride supérieur (cf. tableau 3 en annexe).

Des essais de charge sur parcelles mises en défens en forêts d'Oum Jdour, Mrhilla et Ousseltia, (Gouvernorats de Kasserine pour les deux premiers sites et de Kairouan pour le troisième) ont confirmé ces valeurs (El Hamrouni et Sarson, 1975 ; El Hamrouni, 1978), du moins pour le semi-aride (*sensu lato*). Dans le plus optimiste des cas et pour l'ensemble des formations de pin d'Alep, la production pastorale moyenne de leurs parcours ne dépasserait pas 200 U.F./Ha. Cette production est consommée par les troupeaux lors de leur séjour en forêt. La durée de ce séjour varie selon les régions. Dans leur mission d'étude et d'élaboration de plans de gestion des parcours forestiers (projet de développement forestier PDF2), El Hamrouni et Ben Fredj (2000), mentionnent comme suit le nombre de mois que passent les troupeaux sur les périmètres pastoraux visités :

- Toute l'année, aux périmètres de Sidi Hmada (Jbel Serj) et de Boukhil (Jbel Mrhilla), situés respectivement aux gouvernorats de Siliana et de Kasserine.
- 10 mois, de septembre à juin, au périmètre de Zouaouine-Aïn Ragada (arrondissement de Ben Arous).
- 9 mois, de septembre à mai, à Jbel Hattous, forêt mixte de pin d'Alep et de thuya (Hammamet).
- 8 mois, de novembre à juin, aux périmètres de Sidi Nasr (forêt de Touiref, Le Kef) et de Sidi Messaoud (Sbikha, Gouvernorat de Kairouan).
- Chaumes, jachères et nappe alfatière accueillent les troupeaux le reste de l'année.

4. Les troupeaux

Nous examinerons leur taille, leur composition, leur conduite, leurs besoins et leurs performances.

4.1. Taille et composition

En nous basant sur le recensement de la population forestière en Tunisie (Direction Générale des Forêts, 2012) et en tenant compte des chiffres qui concernent les gouvernorats de Zaghouan, Siliana, Kairouan, Kef, Kasserine et Sidi Bouzid, nous pourrions avoir une idée sur le nombre total de foyers usagers de la forêt, la surface forestière dont ils disposent, la taille et la composition de leurs troupeaux.

Le tableau 4 en annexe, montre qu'au niveau de l'ensemble de ces 6 gouvernorats, il y a 57719 ménages usagers de la forêt de pin d'Alep, disposant en moyenne de 8,85 ha/ménage et de 41 UPB (unité petit bétail), comme taille moyenne des troupeaux, en considérant qu'un bovin équivaut à 5 ovins ou caprins. Les troupeaux que possèdent les usagers s'avèrent mixtes, où les ovins

représentent 53,6%, les bovins 27% et les caprins 19,4% des effectifs. Au bassin versant de Oued El Hajel (Direction des Forêts, 1977), les bovins, convertis en UPB, représentaient 5,1%, les caprins 12,8% et les ovins 82,1% des effectifs. On constate alors que la possession du cheptel en forêt est dominée par les ovins, appartenant par ailleurs à diverses races (Barbarine, Queue fine de l'Ouest, Noire de Thibar) et que la chèvre, après avoir été interdite durant plus d'une décennie, se reconstitue progressivement. Entre 1962 et 1994, la population de cette dernière espèce dans le Sud du pays est passée de 16% à 28% (Ben Mansoura et Garchi, 2000).

Le recensement de 2012 nous permet de dire que l'importance du cheptel en forêt de pin d'Alep en cette date, serait de l'ordre de 2.366.479 UPB. La superficie forestière totale dont disposent les ménages usagers et que nous supposons également disponible au pacage serait de 510.813 ha.

4.2. Conduite

L'élevage en forêt est conduit en général d'une manière extensive. Abrisés la nuit dans une "gricha" comme bergerie pour les petits ruminants, dans une petite étable pour les bovins, les troupeaux, sous la garde d'un enfant ou d'une vieille personne, passent toute la journée, en vaine pâture, sur les parcours forestiers. Au retour à la bergerie, un complément d'alimentation leur est servi, particulièrement durant la période de saillies et des mises-bas (paille, foin, raquettes découpées de cactus, grignon d'olive, orge ou aliment concentré). Si les bovins du village de la Kessera sont conduits le matin sur le plateau qui porte le même nom et ramenés le soir à l'étable, passent la journée à paître sans bouvier, au Bagou ils y restent jour et nuit ; leurs propriétaires ne leur rendent visite que lorsqu'ils ont besoin de vendre les taurillons qu'ils capturent avec peine. Dans ce système d'élevage traditionnel, mâles et femelles sont toujours ensemble, avec en moyenne, un bélier pour 80 brebis et un bouc pour 40 chèvres. Ceci a pour conséquence un étalement des naissances sur trois à quatre mois (El Hamrouni, 1978). Le même auteur rapporte que les antenaises et

les chevrettes représentent respectivement 12% et 6% des effectifs, montrant ainsi que les adultes sont majoritaires et que leur réforme, sinon absente, du moins elle est tardive (8-9 ans).

4.3. Santé des animaux

Les usagers-éleveurs profitent des campagnes annuelles de vaccination, organisées par les services techniques du ministère de l'agriculture, abandonnant les pratiques ancestrales d'utilisation du tabac à priser, l'huile d'olive ou le goudron du genévrier, pour soigner certaines affections de leurs bêtes. Ils n'hésitent plus à faire appel au vétérinaire quand il le faut.

La mortalité des jeunes était de 13% pour les agneaux et légèrement inférieure à 4% pour les chevreaux. Inversement, le taux d'avortement de 3% pour les ovins, passe à 14% pour les caprins. Mortalité des jeunes et avortement des femelles sont généralement dus au froid et à la sous-alimentation (El Hamrouni, 1978).

Les jeunes sont généralement vendus juste après le sevrage ou engraisés et écoulés juste avant la fête du sacrifice "Aïd el-Idha".

Si le peu de lait est consommé par le ménage, la vente des jeunes (agneaux et chevreaux), des femelles réformées et des toisons de laine, constituent les recettes de l'élevage qui représentent en moyenne 20% du revenu familial.

4.4. Besoins alimentaires d'une UPB

En élevage extensif, le poids moyen d'une UPB est de 30kg. Ses besoins alimentaires d'entretien sont de 0,0133 UF/kg de poids vif (projet FAO-TUN 8 :1968 ; in El Aouni et Sarson, 1975), soit 146 UF/an en moyenne. Pour Leroy (1948), cité par les mêmes auteurs, il faut 4 UF/kg de croissance.

Les parcours forestiers sous pin d'Alep produisant en moyenne 200 UF/an (cf. supra), procurent un gain de poids de 13,5 kg/UPB/an ou 37g. / JP (=journée de pâturage).

5. Charge, dégradation et amélioration des parcours

L'examen du tableau 4, nous permet de déduire, compte tenu du nombre moyen d'UPB et de la surface totale pâturée, que la charge réelle de 6,3 UPB/ha imposée à ces parcours, dépasse largement leur capacité de production. A titre comparatif, une enquête effectuée sur certaines parcelles des séries forestières de Sakiet Sidi Youssef et de Touiref (SCET, 1966), totalisant 7048 ha, pâturés par l'équivalent de 9149 UPB, ne supportaient qu'une charge de 1,3 UPB/ha. Si on admet qu'à l'époque cette dernière représente l'ensemble des forêts tunisiennes de pin d'Alep et que l'on fasse la comparaison avec celle de 2012, on constate qu'elle a plus que quintuplé en moins d'un demi-siècle. Si on admet aussi qu'une telle augmentation de la charge est linéaire, le rythme de progression serait de 0,1 tête/ha/an

Cette lourde pression sur les parcours (et sur la forêt) a eu une double conséquence : la disparition de leurs bonnes plantes alibiles et son corollaire, le surpâturage qui a augmenté à des taux intolérables. Ils n'y abondent que les épineuses peu touchées par le cheptel, comme *Calicotome intermedia*, *Erinacea anthyllis*, *Astragalus numidicus*, celles qui sont totalement refusées comme *Ferula communis*, *Asphodellus microcarpus* ou celles sur lesquelles les troupeaux ne se rabattent qu'en période de disette, comme *Hertia cheirifolia*. Déterminé par la formule de Le Houérou (1969) en différentes dates et en différentes parties de la pinède, le taux moyen de surpâturage illustré par la figure 1 ne fait que grimper et se présente comme suit :

- 23% en 1966
- 39% en 1978
- 61% en 2000
- 78,4% en 2012

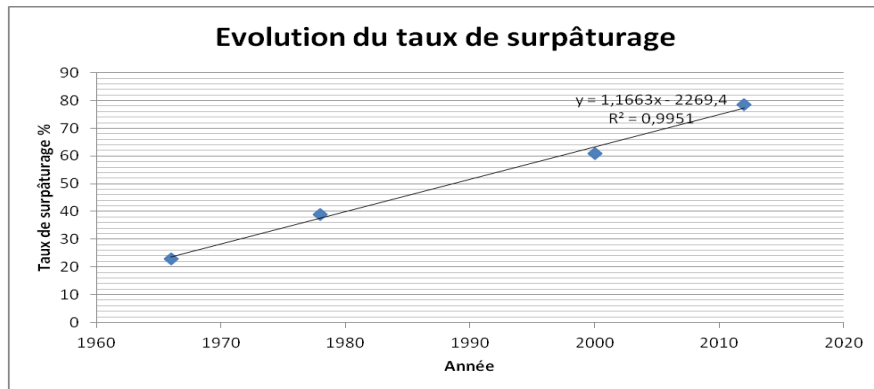


Figure 1 : Evolution du taux de surpâturage (El Hamrouni, inédit).

Suite aux résultats de la recherche (INRAT, INRF) et aux projets de coopération bilatérale ou internationale, exécutés en général avec l'aide technique de la FAO, un vaste programme de réhabilitation des parcours forestiers et steppiques, voire toute une stratégie sylvopastorale, ont été élaborés et mis en application. La stratégie est basée sur l'établissement de plans d'aménagement exigés par le code forestier, leur exploitation par application du système de rotation des parcelles, des mises en défens temporaires et leur enrichissement par plantation d'arbustes ou par semis d'espèces herbacées à bonne valeur fourragère (*Atriplex* sp, Cactus, Acacia, Luzerne arborescente, luzernes annuelles). L'organisation des usagers de la forêt, en Groupements de Développement Agricole (GDA), pourrait jouer un rôle important dans la réussite des travaux,

Dans les terrains se prêtant à l'amélioration pastorale (clairières, friches à romarin), ces arbustes peuvent fournir aux troupeaux une production fourragère importante, exploitable en pâturage direct ou par coupe. Le tableau 5 porté en annexe donne les espèces, la durée, la consommation journalière en kg/MS et le gain ou perte de poids en g/jour (Le Houérou, 1986).

Un essai de charge sur une parcelle de luzerne arborescente a montré que dans les régions à pluviométrie annuelle moyenne de 400 mm, il est possible d'obtenir 3600 UF/ha dont 2/3 reviennent à la luzerne et 1/3 aux herbacées entre

les lignes (El Hamrouni et Saron, 1975). Ceci autorise à dire que là où il est possible d'introduire cette espèce, intéressante par sa biomasse verte, sa forte production de gousses, sa capacité d'améliorer la fertilité du sol, il est alors vivement conseillé de le faire.

Afin de faire face aux périodes de soudure et de sécheresse, d'alléger la pression sur les parcours, il y a eu recours à la création de réserves pastorales, basées surtout sur la taille de l'Acacia et la distribution de ses branches aux animaux, en bergerie.

Les opérations d'amélioration des parcours, aussi bien en forêt qu'en steppe (les parcours sont soumis au régime forestier), ont permis entre 1976 et 1984, la réalisation de 32101 ha (Chouaib, 1985) dont 11030 ha dans l'aire du pin d'Alep (gouvernorats de Zaghwan, Siliana, Kef, Kasserine, Sidi Bouzid, Kairouan).

Arrêté au 31/12/1993, ventilé par espèce et par gouvernorat, l'état de plantation des arbustes fourragers ainsi que les superficiesensemencées est donné au tableau 6 en annexe, pour les gouvernorats à pin d'Alep déjà cités. Les projets de développement forestier (PDFI et PDFII) ont renforcé une telle action qui ne cesse de se développer dans le cadre de la stratégie du développement sylvopastoral citée plus haut, à une cadence moyenne de 5000 ha/an.

6. Développement de l'élevage en forêt

S'il n'est pas possible de supprimer l'élevage en forêt, il est possible de l'organiser et de le développer. C'est au niveau de la flore pastorale, de l'animal et de l'usager forestier-éleveur qu'il convient d'intervenir.

6.1. La flore pastorale

A côté des espèces du sous-bois dont les qualités bromatologiques de leur majorité restent encore indéterminées, la flore pastorale a été enrichie

spécialement par *Opuntia ficus barbarica*, *Atriplex nummularia* et *Acacia saligna*. Le rôle du cactus dans l'alimentation du bétail et plus particulièrement celui de la variété inerme, était connu depuis fort longtemps par les éleveurs du centre du pays. Les deux autres, introduits d'Australie, sont recommandées par la recherche scientifique.

Pour enrichir et diversifier le couvert végétal, arrêter l'érosion génétique de ses bonnes plantes pastorales, protéger son sol contre l'érosion hydrique, augmenter sa biomasse et améliorer sa production fourragère, il convient d'aménager les parcours, d'imposer la rotation des parcelles, respecter leur capacité de charge et pour mieux les améliorer, d'ajouter à cette triple « panacée (cactus, *Atriplex*, *Acacia*) » d'intéressants autres arbustes fourragers jusque-là négligés. Nous recommandons plus particulièrement les espèces suivantes, à introduire dans des pastoretums d'élimination répartis dans l'ensemble des bioclimats et leurs variantes hivernales, des parcours des forêts de pin d'Alep. Leur résistance au froid, à la sécheresse et aux conditions édaphiques sont à connaître d'une manière précise, ce qui constituera des axes de recherche fort utiles pour le développement de tels parcours.

L'installation de parcelles pilotes et d'essais devrait permettre de déterminer la densité de plantation, la phénologie, la productivité, la nature et la période de production, le mode et l'époque d'exploitation des arbustes et herbacées suivants (plus haut): *Gleditschia triacanthos var inermis*, *Prosopis juliflora*, *Ceratonia siliqua*, *Parkinsonia aculeata*, *Acacia aneura*, *Colutea atlantica*, *Chamaecytisus albidus*, *Sophora japonica*, *Coronilla valentina* pour leurs gousses et leurs feuilles, *Brachychiton populneum*, *Broussonetia papyrifera*, *Periploca angustifolia*, *Anthyllis barba-jovis* pour leurs feuilles et *Rhus tripartita* pour ses feuilles et drupes, ces dernières étant comme celles de *Ziziphus lotus*, fort appréciées par les populations autochtones.

Entre les lignes de ces espèces qui peuvent être plantées seules ou en association, un mélange de graines d'espèces de Poacées et de Fabacées à écologie conforme aux conditions du milieu et se ressemant spontanément par la suite (*Lolium rigidum*, *Dactylis glomerata*, *Trifolium sp*, *Medicago sp*) pourrait être

fait, après un léger crochitage si le sol s'y prête ainsi qu'un épandage d'une centaine d'unités de superphosphate. Il y a cependant lieu de respecter l'équilibre arbustes-herbacées de manière à ce que ces dernières ne soient pas gênées par l'ombre des premiers (Ben Mansoura *et al*, 2006).

6.2. L'animal

D'un poids moyen et d'un gain quotidien faibles, bovins, ovins et caprins souffrent d'une mal nutrition chronique. Véritables squelettes ambulants, les bovins, issus de croisements de la brune de l'Atlas, race locale rustique, avec des souches importées, n'ont que les os sous la peau en année de disette. Ils côtoient les maigres petits ruminants à tête rousse ou noire, à queue grosse ou fine pour les ovins, à petit format pour les caprins locaux.

Dans cet ensemble d'amalgames de races et de types, une sélection massale et une amélioration phénotypique et génotypique devraient y être opérées. Des géniteurs adaptés aux conditions écologiques de la pinède sont à introduire pour une amélioration des paramètres zootechniques des divers troupeaux.

6.3. L'usager forestier-éleveur

Si la flore et les troupeaux sont relativement maitrisables, il n'en est pas de même de l'éleveur. Son exploitation minière des parcours et son ignorance des règles de leur exploitation judicieuse, son penchant de penser plutôt nombre que qualité de ses animaux, son individualisme et son indiscipline, le mode archaïque de conduire son troupeau, sont autant d'obstacles à lever pour faire de lui un bon moutonnier, un bon chevrier ou un bon vacher. Un grand effort de formation, d'information, de sensibilisation, de persuasion et de conviction est à faire pour substituer à sa mentalité de destructeur, celle d'un bon conservateur et d'un bon utilisateur des ressources fourragères que lui offre bénévolement la forêt.

7. Conclusion

Pâturés depuis au moins 3000 ans, les parcours forestiers de la Tunisie et particulièrement ceux des forêts de pin d'Alep sont à bout de souffle. Formés surtout de petits ligneux à valeur nutritive faible, supportant une pression animale qui dépasse leur capacité de charge durant au moins 8 mois consécutifs par an, ils présentent un taux de surpâturage grimpant vers les 80% et sont très peu productifs. A peine peuvent-ils assurer 200 UF/kg MS permettant à une UPB, dans un système traditionnel d'élevage, de réaliser un gain de poids de 37g / journée de pâturage.

Afin de stopper la dégradation des parcours forestiers, la recherche et l'administration forestière ont pris à cœur, de concert, la réhabilitation de l'espace sylvopastoral. Des espèces fourragères autochtones et exotiques furent sélectionnées, des réserves sur pieds créées, d'importantes superficies forestières plantées en arbustes fourragers et leurs techniques d'exploitation précisées. Ces actions amèneront les usagers forestiers en cours d'organisation, à substituer progressivement au pacage anarchique, la gestion rationnelle de ces parcours. Malgré ce qui a été fait, les parcours restent les parents pauvres de la recherche forestière. Le personnel qui s'en occupe est limité. Trois ou quatre chercheurs ne peuvent à eux seuls s'occuper d'un si vaste et si intéressant domaine. C'est tout une équipe de botanistes, phytoécologues, physiologistes, biochimistes, nutritionnistes, zootechniciens, vétérinaires, sociologues, juristes, économistes, animateurs, qu'il faudra pour élucider ses différentes facettes. L'implication sérieuse, la conjugaison, la coordination voire la fusion des efforts des différentes administrations, des différents instituts de recherche, des différents laboratoires et des différents chercheurs intéressés par le problème, dans le cadre d'une réflexion commune et un programme de recherche défini et planifié en commun, où chaque partie prenante est responsable devant les autres de ce qu'elle doit réaliser. Les résultats des travaux exposés lors d'un séminaire annuel seront évalués par une commission nationale quant à leur valeur pratique en matière de réhabilitation et de développement des parcours forestiers.

C'est à ce titre et à ce titre seulement que se feront la conservation de la flore pastorale, le développement de l'élevage et de l'éleveur non seulement au niveau de parcours forestiers mais au niveau de tous les écosystèmes pastoraux de la Tunisie.

Références bibliographiques

- Ben Ameer M. et Blummeyer A., 1974 - Composition chimique et valeur alimentaire des fourrages grossiers. *Note tech. INRA Tunis*.
- Ben Mansoura A., Ammari Y., Sey S. et Laâmouri A., 2006 - Mitigation de l'ombrage pour une production optimale d'herbage et de bois dans la forêt de pin d'Alep d'Oum J'dour. *Annales de l'INRGREF*, 9(2): 127-149.
- Ben Mansoura A. et Garchi S., 2000 - Dégradation des parcours et des sols au Sud tunisien en fonction de la dynamique du cheptel domestique. *The Land (2000) 4.2. 93-110*.
- Chouaib T., 1984 - Analyse de la situation des parcours en Tunisie et synthèse des réalisations d'améliorations pastorales (arrêtées au 31/12/1984) (au 31/12/1984). Direction des forêts ; Ministère de l'agriculture.
- Direction des Forêts, 1977- Projet d'aménagement pastoral et de conservation des eaux et du sol (Bassin versant de Oued El Hadjel, M'nassa, rive gauche). Elaboré en collaboration avec l'arrondissement forestier de Kairouan. Projet FAO-SIDA-TUN 55 et 13 SWE (Assistance au développement des actions forestières en Tunisie).
- Direction Générale des Forêts, 2012- *La population forestière en Tunisie : un révérenciel économique et social national*. Facility. giz
- El Aouni H. et Sarson M., 1876 - Production primaire et valeur pastorale de certains types de maquis des Mogods non calcaires. *Note de recherche n° 12 INRF*.
- El Hamrouni A., 2000- Forêts et populations forestières en Tunisie In : MEDENPOP : population rurale et environnement en milieu bioclimatique. Méditerranéen. Djerba 25-28 Octobre 2000
- El Hamrouni A., 1995- Les atriplex et leur intérêt en Tunisie. 1^{er} séminaire du réseau ATRIPLEX. In : Programme STD3 N° ERB3504 PL921277. Tunis 28-30 avril 1995.
- El Hamrouni A., 1992- Végétation forestière et préforestière de la Tunisie : typologie et éléments pour la gestion. Thèse Doc. Etat ès Sci. Fac Sci. et Tech. Marseille St Jérôme, Univ. Aix-Marseille III.
- El Hamrouni A., 1985- Atriplex species and other shrubs in rangeland of North Africa. In : Séminaire parcours, Perth-Australie
- El Hamrouni A., 1985- les systèmes pastoraux maghrébins face à la désertification. In : Consultation sur la forêt dans la lutte contre la désertification 18-20 juin 1985-Satillou, Mexique.
- El Hamrouni A., 1978- Etude phytoécologique et problèmes d'utilisation et d'aménagement dans les forêts de pin d'Alep de la région de Kasserine (Tunisie centrale). Thèse Dr.ing. Fac Sci. et Tech. Marseille St Jérôme, Univ. Aix-Marseille III.

- El Hamrouni A. et Ben Fredj, 2000- Mission d'étude et d'élaboration des plans de gestion des parcours forestiers du projet PDFII. In : 2^{ème} rapport sur l'état d'avancement des travaux, nov/déc. 2000.
- El Hamrouni A. et Khémiri A., 1979- Production de viande sur prairies d'embouche à Tabarka (Tunisie). Note de recherche n°12. INRF Tunis.
- El Hamrouni A., et Sarson M., 1975- Résultats d'un essai de charge sur une parcelle de *Medicago arborea* L. Note de recherche n°14 INRF. Tunis.
- El Hamrouni A. et Sarson M., 1975- Exploitation de parcours forestiers en Tunisie centrale. *Academia agraria Georgofili* (n° spécial), Florence.
- El Hamrouni A. et Sarson M., 1975- Appétibilité de certains *Atriplex* spontanés ou introduits en Tunisie. Note de recherche n°8. INRF Tunis.
- Floret Ch. et Pontanier R., 1978- Relations sol-climat-végétation dans quelques formations végétales spontanées du Sud tunisien (Production végétale et bilan hydrique des sols). In Projet PNUD/TUN 89/001 – CHRS/CEP L. Emberger Montpellier- IRA Médenine. Tunisie.
- Le Houérou H.N., 1986 - Salt tolerant plants of economic value in the Mediterranean basin. *Reclamation and revegetation research* 5. pp: 319-341.
- Le Houérou H.N. et Ionesco T., 1973 - Appétibilité des espèces végétales de la Tunisie steppique. In : Doc. Travail .Projet FAO/TUN 71/525. Tunis
- Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire, 1995 - Stratégie Nationale de la Diversité Biologique en Tunisie.
- Saadani Y., 1988 - Production fourragère et comportement alimentaire des ovins et des caprins dans un parcours mixte à *Acacia cyanophylla*, *Atriplex nummularia* et *Medicago arborea*. Mémo. 3^{ème} cycle agro. Option : Pastoralisme. IAV Hassen II-Maroc.
- SCET, 1966 - Forêt domaniale de Touiref. Projet de procès-verbal d'aménagement 1968-1987. Sous-secrétariat d'Etat à l'Agriculture, Direction des Forêts
- Schmidt-BRR H., et Ben Dhia M., 1972 - Teneur des aliments d'origine tunisienne en Phosphore, Calcium, Sodium et Potassium. Etude des possibilités de couverture des besoins des animaux en ces éléments. Note tech. INRAT, Tunisie.

Annexes

Tableau 1 : Classement d'espèces pastorales ligneuses suivant leur degré d'appétence.

Rang	Espèce	N°INRF
1	<i>Atripex halimus</i>	70100
2	<i>Atripex halimus</i>	67714
3	<i>Atripex nummularia</i>	66620
4	<i>Atripex halimus</i>	67713
5	<i>Atripex halimus</i>	67715
6	<i>Atripex nummularia</i>	68048
7	<i>Atripex nummularia</i>	64918
8	<i>Atripex halimus</i>	67716
9	<i>Atripex halimus</i>	67717
10	<i>Atriplex halimus</i>	67712
11	<i>Atripex nummularia</i>	69539
12	<i>Atriplex nummularia</i>	68047
13	<i>Atripex halimus</i>	67711
14	<i>Atriplex polycarpa</i>	70088
15	<i>Acacia ligulata</i>	

(Source : El Hamrouni et Sarson, 1975)

Tableau 2 : Analyse chimique de quelques espèces du sous-bois du pin d'Alep.

Espèce	% de la matière sèche (MS)										MAD g/kg MS	UF/ Kg MS
	MS	MM	MC	MA	MG	ENA	P	Ca	K	Na		
<i>Ampelodesma mauritanica</i>	65,9	7,9	35,6	3,6	3,4	49,5	0,04	0,45	0,36	0,01	12	022
<i>Colutea atlantica</i>	25,5	9,2	14,3	19,6	7,5	48,3	0,31	1,55	2,40	0,03	63	0,28
<i>Dactylis glomerata</i>	30,6	10,5	33,7	10,1	3,1	42,6	0,15	0,49	1,42	0,12	85	0,26
<i>Ebenus pinnata</i>	31,5	6,3	30,5	12,3	2,5	47,5	0,15	0,93	0,79	0,13	25	0,30
<i>Fumana ericoides</i>	48,2	9,0	31,0	6,3	3,7	50,0	0,13	2,48	0,37	0,06	36	0,27
<i>Globularia alypum</i>	53,9	4,2	23,8	4,6	5,8	61,6	0,05	0,91	0,07	0,00	35	0,29
<i>Phillyrea latifolia</i>	45,1	5,0	25,6	8,1	6,3	55,0	0,08		1,25	0,03	42	0,28
<i>Rosmarinus officinalis</i>	47,5	5,5	23,2	6,4	14,5	50,4	0,08	0,92	1,20	0,01	38	0,16

(Source : Tiré de A. El Hamrouni et M. Sarson, 1974)

MS= matière sèche ; MM= matière minérale ; MC= matière cellulosique ; MA= matière azotée ;
MG= matière grasse ; ENA= extractif non azoté ; MAD= matière azotée digestible ; UF= unité fourragère
P = Phosphore ; Ca= Calcium ; K= Potassium ; Na= Sodium

Tableau 3 : Pluviométrie et production des parcours.

Type de parcours selon le bioclimat	Pmm	UF/Ha
Subhumide	550	270
Semi-aride supérieur	450	180
Semi-aride inférieur	350	140
Arde supérieur	200	120

(Source : El Hamrouni, 1978)

Tableau 4 : Ménages usagers et leur cheptel.

Gouvernorat	Ménages usagers	Ha par ménage	Ovins par ménage	Caprins par ménage	Bovins par ménage	Total cheptel en UPB
Zaghouan	9,456	6,69	15	2	2	27
Siliana	6,523	17,65	23	11	4	54
Kairouan	10,358	5,76	19	17	1	41
Kasserine	14,020	10,60	12	4	2	26
Kef	14,503	6,95	40	8	2	58
Sidi Bouzid	2,859	5,43	23	8	2	41
Totaux Gvt	57,719	5308	132	48	13	245
Moyenne/Gvt	-	8,85	22	8	2,17	41

(Source : Direction Générale des Forêts)

Tableau 5 : Arbustes fourragers et gains de poids du cheptel en g/j/tête.

Espèces	Durée (jours)	Consommation Kg M.S./Jour/Tête	g/Jour/Tête
A. nummularia+ Cactus+ pâturage	91	0,17	+116,5
A. nummularia + Cactus	"	1,67	+50,5
A. nummularia + Acacia + pâturage	196	0,69	+33,7
A. nummularia + Acacia saligna	"	2,04	+17,8
Pâturage seul	238		-1,47

(Source: Extrait de Le Houérou, 1989)

Tableau 6 : Etat des plantations d'arbustes fourragers arrêté au 31/12/1994.

Gouvernora	Plantations (Ha)						Semis(Ha)
	Acacia	Atriplex	Cactus	Luzerne	Divers	Total	
Kef	5458	1078	2342	874	5	9758	128
Siliana	3048	442	3925	35	68	7518	0
Kairouan	6363	1797	2234	10	730	11134	1585
Kasserine	1314	74	6060	15	282	7745	228
Sidi Bouzid	2618	137	14958	15	25	17753	0
Zaghouan	3000	70	341	55	30	3495	0
Totaux	21801	3598	29860	1004	1140	57403	1941

(Source: Direction Générale des Forêts)

CHAPITRE 14

Le bois du pin d'Alep Tunisien : propriétés, potentialités et débouchés

Mohamed Tahar Elaieb¹, Habib Kachouri⁴, Sofien Azzouz⁵, Foued Shel²,
Mohamed Larbi Khouja¹ et Kévin Candelier³

¹Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), B.P. 10, 2080 Ariana, Université de Carthage, Tunisie

²Arrondissement des forêts, Sousse, rue d'Alger 4029, Sousse, Tunisie

³CIRAD - Unité de Recherches BioWooEB, TA B 114/16, Montpellier, France

⁴Régie d'Exploitation Forestière. 30 rue Alain Savary, 1002, Tunis, Tunisie

⁵Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique, Faculté des sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, Tunis, Tunisie

Email: ayeb2002@yahoo.fr

Résumé. Ce chapitre est une synthèse des travaux réalisés par différents auteurs, sur le bois du pin d'Alep en Tunisie. Ces travaux portent principalement sur les propriétés technologiques du bois, sur ses diverses utilisations et fournissent des éléments clés sur ses potentialités réelles et les possibilités de sa valorisation à l'échelle locale. A l'heure actuelle, les principaux débouchés industriels du bois du pin d'Alep en Tunisie, sont orientés vers la fabrication de palettes et de granulés pour des fins énergétiques. Malgré ses propriétés physiques et mécaniques acceptables, les usages du bois du pin d'Alep se voient limités, à cause de la présence récurrente de certains défauts physiques : nœuds, mauvaises formes, faible durabilité naturelle, poches de résine, etc.

Afin de pallier les imperfections inhérentes au matériau bois, on a généralement recours à différents procédés industriels qui peuvent être appliqués soit en amont, moyennant une sylviculture appropriée, soit en aval, une fois l'arbre abattu et débité. Parmi les traitements, appliqués directement sur le matériau bois, on peut citer le traitement thermique par pyrolyse douce ou le déroulage en vue d'obtenir des placages pour en faire de nouveaux matériaux d'ingénierie comme le LVL (Laminated Veneer Lumber). Ce dernier procédé est encore à l'étude.

Toutefois, un besoin indéniable d'amélioration des pratiques actuelles d'exploitation de cette ressource persiste. La révision d'une classification, basée sur les besoins principalement du marché tunisien, d'une part, et sur les qualités réelles de cette essence, d'autre part, constitue une priorité. Elle permettrait de mettre en avant les qualités des produits réalisés à base du bois du pin d'Alep et de relativiser les préjugés, qui le caractérisent comme étant un matériau de mauvaise qualité.

Mot clés : pin d'Alep, *Pinus halepensis*, propriétés physiques, propriétés mécaniques, séchage, durabilité, transformation.

Abstract Tunisian Aleppo pine wood: properties, potentialities and outlets This chapter is a synthesis of the works carried out by different authors, on Tunisian Aleppo pine wood. It focuses on the technological properties of wood, its various uses and provides key elements on its real potentialities and the possibilities of its valorization at the local level. Currently, the principal industrial outlets for Aleppo pine wood in Tunisia are oriented towards the production of pallets and pellets for energy purposes. Despite its physical and mechanical properties, the use of Aleppo pine wood is limited, due to the recurrent presence of some physical defects: knots, bad shapes, low natural durability, pockets of resin, etc.

In order to overcome the inherent imperfections in the wood material, various industrial processes are generally used, which can be applied upstream, with appropriate forestry or downstream, once the tree is beaten down and cut. Among the treatments applied directly to the wood material, one can mention the heat treatment by soft pyrolysis or the peeling in order to obtain veneers to make new engineering materials such as LVL (Laminated Veneer Lumber). This last process is still under study.

However, there is an undeniable need to improve current practices for the exploitation of this resource. The revision of a classification, based on the needs mainly of the Tunisian market, on the one hand, and on the real qualities of this species, on the other hand, is a priority. It would highlight the qualities of the products made from Aleppo pine wood and relativize the prejudices, which characterize it as a material of poor quality.

Keywords: Aleppo pine, *Pinus halepensis*, physical properties, mechanical properties, drying, durability, transformation.

1. Introduction

En Tunisie, les forêts de pin d'Alep couvrent environ 361 250 ha, représentant plus de 53% des forêts tunisiennes (DGF, 2010). Environ les deux tiers de ces forêts sont des peuplements naturels qui se développent dans des milieux semi-arides du nord et au centre de la Tunisie. Le pin d'Alep est une espèce typiquement méditerranéenne, s'adapte facilement à diverses conditions écologiques, ce qui lui confère le privilège d'être l'espèce la plus utilisée dans les programmes de reboisement du pays. Dans le cadre de l'exploitation forestière ou des interventions sylvicoles, la quantité de bois qui pourrait être mobilisée est considérable, et pourrait satisfaire plusieurs usages industriels (bois d'œuvre, industrie de platelage, industrie du papier, industrie des palettes ...) (Elaieb *et al*, 2017b ; Haddad *et al*, 2009). Néanmoins, son taux d'utilisation industrielle reste faible par rapport à la disponibilité du bois.

Les propriétés technologiques du pin d'Alep ont été peu étudiées (Dilem, 1992 ; Thibaut *et al.*, 1992 ; Elaieb *et al.*, 2017b) bien qu'elles présentent une forte variabilité en fonction de différents facteurs externes, notamment l'âge des arbres et les conditions de croissance (Malkh, 2001). Ces études et recherches ont fait ressortir que les caractéristiques intrinsèques du pin d'Alep sont souvent proches de celles du pin maritime (Keller, 1973) et restent très variables en fonction de la répartition géographique des peuplements. Une meilleure connaissance de cette variabilité et de ses facteurs explicatifs permettrait d'envisager le développement de l'utilisation d'une partie de la ressource disponible pour certains emplois, en remplacement des résineux plus conventionnels importés (Epicéa, pin sylvestre, pin maritime ...).

2. Quelques caractéristiques structurales du pin d'Alep

2.1. *Aspect macroscopique du bois*

Le bois du pin d'Alep est bien différencié, avec un aubier blanc jaunâtre et un duramen brun, souvent, fortement engorgé de résine (Christel et Thierry, 1995). La limite entre le duramen est l'aubier n'est pas systématiquement bien nette. Les cernes annuels sont sinueux mais observables, sans difficulté. La zone du bois final est foncée, étroite et se différencie assez nettement de la zone du bois initial (figure 1). Le grain du bois conséquence directe de la dimension de ses éléments anatomiques est généralement moyen, voire grossier pour certains arbres.



Figure 1 : Bois du pin d'Alep [arboretumJbel Abderrahman, Cap Bon - Tunisie, Lat. : 36°42', Long. : 10°40'][®](Elaieb *et al*, 2010).

Le bois peut déjà montrer des défauts dès son abattage. Quiquandon (1966) étudiant les grumes de quatre arbres différents, provenant de reboisements et de forêts naturelles en Tunisie, a montré la présence de gros nœuds dans la partie supérieure des grumes, d'une légère fibre torse et d'une excentricité du cœur, au sein de l'aubier. Des pourritures ont été également mises en évidence au cœur des billes de pied et, plus particulièrement chez des arbres âgés de plus de 80 ans, provenant principalement de peuplements naturels. Ces défauts rendent le classement des débits, obtenus au sciage, très médiocre, ce qui limite les possibilités de leur emploi dans la menuiserie commune. Mais pour la fabrication des granulés, par exemple, ces défauts n'ont aucun impact.

2.2. Particularité anatomique du bois

Le pin d'Alep appartient au groupe des gymnospermes. Ce groupe présente une organisation relativement simple, uniforme et régulière. Deux principaux types de cellules (les trachéides et les cellules de parenchyme) sont suffisants à constituer les plans ligneux de tous les résineux ; les éléments issus des initiales de l'assise cambiale* restent bien alignés, en particulier dans le sens radial (Keller, 1994).

* *L'assise cambiale: Zone de croissance continue, située entre le liber et le bois, est constituée de deux types de cellules initiales; Les initiales fusiformes et les initiales isodiamétriques.*

Les pins, en général, sont facilement reconnaissables des autres conifères, par la présence de canaux résinifères dans leur bois. Les cellules parenchymateuses (absentes chez le pin d'Alep), qui tapissent ces canaux, ne se lignifient pas, mais restent entièrement à parois minces, avec parfois, çà et là, des épaisissements occasionnels. Cette particularité permet de différencier le genre *Pinus* des *Pseudotsuga*, *Larix* et *Picea*, chez lesquels les cellules des canaux résinifères sont à parois épaisses. En outre, les parois longitudinales des trachéides des pins, sont toujours lisses et dépourvues d'épaissements spiralés sauf, peut-être, dans les premières couches d'accroissement du bois. Cette particularité permet de séparer les *Pinus* des *Torreya*, *Taxus*, *Cephalotaxus*, *Pseudotsuga* et, dans certains cas, des *Larix* et *Picea* (Nahal, 1962). Pour connaître la structure du bois, il est commode de l'examiner selon trois coupes faites dans trois plans perpendiculaires: transversale, perpendiculaire à l'axe de la tige, radiale dans un plan passant par la moelle et tangentielle dans un plan excentré et parallèle à l'axe de la tige (figure 2).

Les trois directions radiale, tangentielle et axiale sont les directions d'anisotropie du bois, pour un grand nombre de ses propriétés physiques, mécaniques et technologiques. L'examen de ces trois coupes chez le pin d'Alep accorde quelques spécificités à son bois:

- *Accroissements annuels* : apparents et zone finale très nette, car le bois d'été est très distinct
- *Rayons ligneux*: Les parois des cellules parenchymateuses des rayons ligneux sont le plus souvent lignifiées et quelque peu épaisses et par conséquent, ne se distinguent pas aisément, dans cette surface. On observe des trachéides transversales à parois plus minces. Cependant, occasionnellement, les parois de quelques cellules des rayons ligneux et même celles de tous les éléments parenchymateux des rayons, restent non lignifiées et minces et ne développent pas de ponctuations. De tels rayons ligneux renferment fréquemment des canaux résinifères. Les rayons ligneux

sont unisériés et ont une hauteur de 8 à 10 cellules environ. Ceux qui renferment des canaux résinifères sont plus hauts (15 cellules environ). Par champ de croisement, on trouve une à 4 ponctuations pinoïdes moyennes.

- *Canaux résinifères*: Les canaux résinifères sont dispersés dans le bois final et dans le bois initial. Les cellules bordantes de ces canaux sont à parois minces. Les canaux verticaux sont nombreux, fins à gros (100-200 μ) et disséminés dans le bois initial et final. Les canaux horizontaux sont plus petits et sont contenus dans certains rayons.

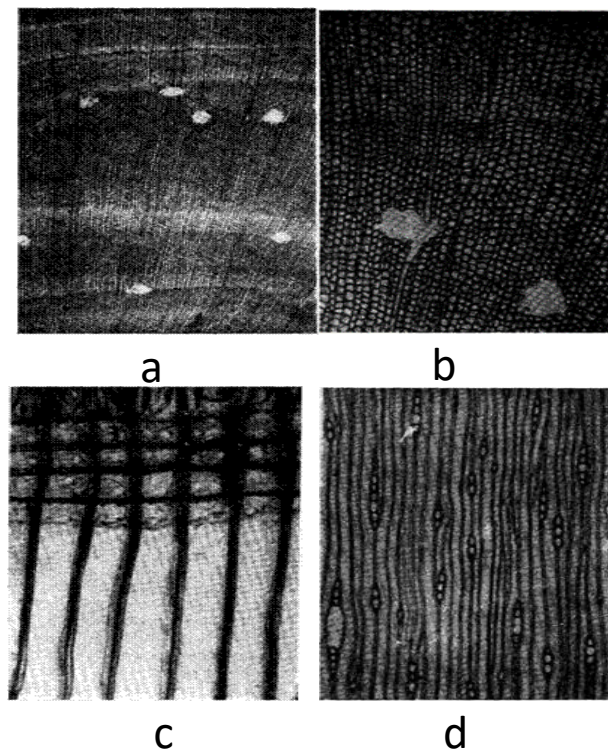


Figure 2: Structure du plan ligneux du pin d'Alep (a) et (b) coupes transversales, (c) coupe radiale et (d) coupe tangentielle (Greguss, 1954).

La texture du bois (rapport entre la largeur du bois final et la largeur totale du cerne d'accroissement annuel) est très variable en fonction de la provenance des arbres. Chez les résineux, la texture augmente avec la vitesse d'accroissement. Il a été rapporté que la texture est plus élevée pour des bois

issus de dispositifs artificiels (expérimentaux) (32-51%) que pour des bois provenant de forêts naturelles (36%) (Dahman, 1976).

2.3. Etude micrographique

Des études micrographiques sur le bois du pin d'Alep tunisien ont été réalisées par Quiquandon (1966) et Dahman (1974). Ces études ont concerné un certain nombre de paramètres tels que l'indice de feutrage et le coefficient de souplesse. Elles ont permis de mettre en évidence le caractère favorable à l'emploi du bois du pin d'Alep en papeterie, bien qu'une attention particulière doive être portée sur la teneur importante en résine contenue dans ce bois. Les résultats relatifs à ces travaux et qui reflètent une sorte d'élancement au niveau de la fibre sont présentés ci-dessous :

$$\text{Indice de feutrage} = \frac{\text{longueur des fibres}}{\text{Diamètre des fibres}} = 82$$

$$\text{Coefficient des ouplesse} = \frac{100 * (\text{Diamètre des fibres} - (2 * \text{épaisseur des parois des fibres}))}{\text{diamètre des fibres}} = 70$$

2.4. Pourcentage des principaux composés chimiques de base du bois

Il est connu que les bio-polymères, constituant le bois du pin d'Alep, sont similaires à ceux des bois du pin maritime (Tableau 1). La variation importante entre ces essences est observée principalement au niveau des substances extractibles.

Une première étude réalisée par Quiquandon (1966) sur le dosage des composés extractibles, utilisant un mélange de solvants Alcool/Benzène, a montré que le taux d'extraits est trois fois plus élevé dans les bois issus de forêts naturelles (5,8 %) que dans celui provenant des sites de reboisement (1,5 à 2%). Ces chiffres sont comparables à ceux trouvés pour le bois du pin maritime (2 %).

Cela nous laisse penser quant à l'effet de la vitesse d'accroissement sur le taux des extraits dans le bois.

Tableau 1: Composition chimique du bois de pin d'Alep et du bois de pin maritime (Haddad *et al*, 2009).

Composants (%)	pin d'Alep	pin maritime
Extraits à l'eau	3,2	1,3
Extraits Alcool/Toluène	1,5	2-4
Cellulose	46,3	47,1
Lignine	26,9	25.6
Furfural	8,4	-
Hémicellulose	14,3	12,3
Taux de cendres	0,31	0,30

Des extraits, réalisés par Elaieb *et al* (2015) sur des échantillons du bois du pin d'Alep artificiel, provenant de l'arboretum de Jbel Abderrahman, avec une autre méthode d'extraction, basée sur un mélange Toluène (2v)/ Ethanol (1v) et effectuée à l'aide d'un Dionex ASE, ont permis d'obtenir un taux moyen d'extraits de bois de 3,6%.

3. Les propriétés techniques du bois

3.1. Propriétés physiques

3.1.1. La densité du bois

La densité du bois, ou masse volumique, est un paramètre physique qui précise la quantité de matière ligneuse contenue dans un volume donné de bois, exprimée en (kg/m³). La densité du bois est un paramètre de qualité essentiel qui explique la plupart de ses propriétés de base (retrait, gonflement, résistances mécaniques...). Le bois étant un matériau poreux et hygroscopique, sa densité s'exprime sous plusieurs formes (tableau 2). En travaillant sur 4 arbres de pin d'Alep (2 issus de forêts naturelles et 2 issus de plantations artificielles), Quiquandon (1966) a trouvé une infra-densité moyenne du bois égale à 0,53. La densité anhydre moyenne est, quant à elle, de 0,58. Cette dernière est nettement

plus élevée pour du bois provenant de forêts naturelles (d'environ 20%). Cela peut être expliqué par le fait que les arbres, issus de plantations de reboisement, présentent un accroissement plus important. Quiquandon (1966) a également noté que la densité du pin d'Alep Tunisien (0,60) est légèrement plus faible que celle du pin d'Alep Algérien (0,68). La différence entre ces valeurs pourrait être due à des teneurs en résine et en extractibles très différentes.

Polge et Keller (1970) ont mené une vaste campagne d'essais sur des peuplements du pin d'Alep (100 arbres), répartis sur quatre stations différentes en Tunisie, ils ont trouvé des infra-densités s'échelonnant entre 0,44 à 0,48. Comme la densité du bois est fortement liée à son humidité, Selmi (1976) a déterminé les densités, à différents taux d'humidité du bois du pin d'Alep, provenant de forêts naturelles de la Dorsale Tunisienne. L'ensemble de ces résultats figure dans le Tableau 2.

Tableau 2: Densité du bois du pin d'Alep à différents taux d'humidité (Selmi, 1976).

Densité basale $\frac{m_0}{V_s}$ (caractérise la production forestière)	0,55
Densité anhydre $\frac{m_0}{V_0}$ (correspond au concept physique de la densité qui s'applique à des matériaux non hygroscopiques)	0,58
Densité à 15% d'humidité $\frac{m_{15}}{V_{15}}$ (densité normalisée)	0,65
Densité à 12% d'humidité $\frac{m_{12}}{V_{12}}$ (densité normalisée)	0,64
Densité à l'état vert $\frac{m_h}{V_h}$ (densité utile dans le transport)	1,08

m0 = masse anhydre; V0 = Volume anhydre; m15 = masse à 15 % d'humidité; m12 = masse à 12 % d'humidité; v12 = volume à 12 % d'humidité; v15 = volume à 15 % d'humidité; mh = masse à l'état vert; Vh = volume à l'état vert

D'autres essais physiques ont été réalisés par Dahman (1986) sur du pin d'Alep en provenance de Kasserine, dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3.

Khouja (1997) a réalisé des mesures d'infradensité (Db) et de pénétrabilité d'un poinçon dans le bois à l'aide d'un pilodyn (longueur de pénétration utilisée comme mesure indirecte de la densité) sur 40 provenances, locales et

étrangères, réparties inégalement dans 3 sites expérimentaux de provenances Henchir Naam (SA), Korbous (SH) et Souiniet (H). Les valeurs moyennes l'infradensité (Db) qu'il a trouvées sont comprises entre 0,42 et 0,47. L'analyse de la variance effectuée n'a pas permis de déceler de différences significatives entre les provenances, contrairement à la station. Ces résultats confirment ceux obtenus par (Polge et Keller, 1970), sur les mêmes provenances.

Tableau 3: Densités du bois du pin d'Alep (Dahman, 1986).

Année	Provenance	Age (Ans)	Ø (cm)	% écorce	H (%)	Dh	D0	Db	Densité à 12% d'H
1976	Kasserine	58	22,5	23,3	65	0,61	0,56	0,46	0,6

Avec : Ø = Diamètre de l'arbre ; H= Humidité ; Dh= Densité humide(kg/m³) ; D0= Densité anhydre (kg/m³) ; Db = Densité basale(kg/m³).

L'étude menée parallèlement sur la variabilité des mesures de pilodyn sur et sous écorce a révélé un effet provenance et un effet station très hautement significatifs. D'après (Khouja, 1997), la présence d'une corrélation significative entre ces deux paramètres, indique qu'il est possible d'estimer l'infradensité à partir des lectures fournies par le pilodyn.

Nasr (2012) a également étudié les variabilités de la densité basale et de la densité anhydre du bois du pin d'Alep, issus de 6 provenances Tunisiennes (Jbel Abderrahmane, Sodga, M'guila, Sakiet, Selloum, Dernaya). Les résultats issus de ce test sont compris entre 0,49 (Jbel Abderrahman) et 0,56 (Dernaia). Bahar (2012) a confirmé les résultats précédents, par l'étude de l'évolution de la masse volumique (figure 3) du bois du pin d'Alep, pour les mêmes provenances, en optant pour un séchage par convection. L'auteur a confirmé que le bois du pin d'Alep se classe comme étant un bois mi-lourd (0,5 < densité < 0,6). Ce même résultat a été trouvé par Ben Dhib (2016) et Elaieb (2017 b).

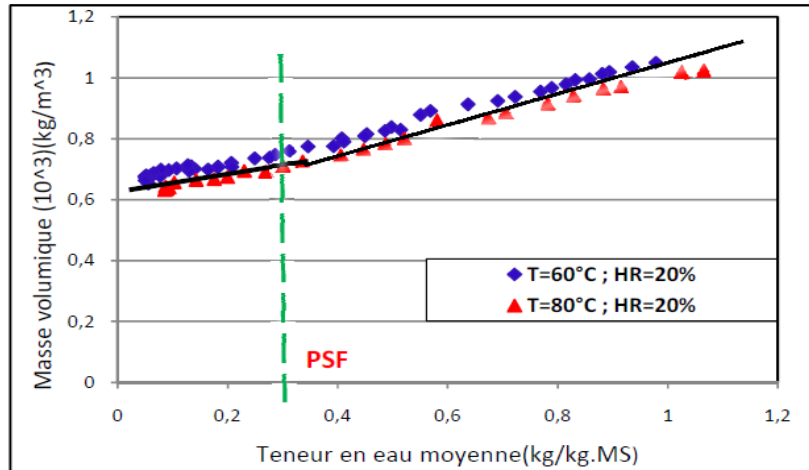


Figure 3: Masse volumique du bois du pin d'Alep, en fonction de la teneur en eau (Bahar, 2012).

En comparaison avec d'autres espèces résineuses, Polge (1992) a mentionné que l'infra-densité du bois du pin d'Alep est très proche de celle du pin maritime, qui varie de 0,41 à 0,48 et est nettement inférieure à celle du pin brutia, dont la densité, à 12% d'humidité, varie d'un pays à un autre : 0,52 en Tunisie, 0,54 en Espagne et 0,62 en Italie.

3.1.2. Variations dimensionnelles (retraits et gonflements)

Les stabilités dimensionnelles du pin d'Alep et du pin maritime en Tunisie ont été étudiées (Polge et Keller, 1970) sur carotte de sondage prélevées à partir de 100 arbres par espèce. Le bois du pin d'Alep se voit doté d'une meilleure stabilité dimensionnelle que celle du pin maritime, grâce à une rétractibilité tangentielle plus faible, qui lui confère une meilleure anisotropie de retrait (rapport du retrait tangentiel au retrait radial) (Tableau 4).

Tableau 4: Retraits mesurés à différents taux d'humidité du bois de pin d'Alep prélevé dans quatre stations échantillonnées dans les forêts naturelles tunisiennes (Polge et Keller, 1970).

	A	B	C	D
Retrait radial, état saturé à sec à l'air (%)	3,006	3,563	3,729	3,571
Retrait radial, état saturé à anhydre (%)	4,980	5,798	6,024	5,925
Retrait tangentiel, état saturé à sec à l'air (%)	4,933	4,933	5,364	5,138
Retrait tangentiel, état saturé à anhydre (%)	6,902	7,460	7,600	7,354
Anisotropie transverse, état saturé à anhydre (%)	1,40	1.29	1.26	1.24

A,B,C,D: sont les quatre stations échantillonnées dans les forêts naturelles tunisiennes du pin d'Alep.

La rétractibilité volumique totale du pin d'Alep est d'environ 11,7% (Selmi, 1976). Cette valeur augmente en fonction de l'emplacement du bois dans l'arbre, du cœur vers l'écorce. Le retrait volumique du bois diminue également en fonction de sa position en hauteur dans la direction verticale du tronc, tandis que le coefficient de rétractibilité est de l'ordre de 0,4 %. Ceci montre, que le bois du pin d'Alep est un bois moyennement nerveux, qui peut ainsi convenir comme bois de service, de structure et de construction. Ces résultats ont été confirmés par des travaux menés par Dahman (1986), Bahar (2012) et Ben Dhib (2016), qui ont mis en avant un retrait volumique total du bois du pin d'Alep, compris entre 11,2 et 16%.

Plus récemment, Elaieb, 2017b) a étudié la variabilité du retrait radial (β_r), du retrait tangentiel (β_t), du retrait volumique (β_v) et le coefficient de d'anisotropie du retrait (β_t / β_r) chez 6 provenances Tunisiennes du pin d'Alep. Les résultats obtenus à partir de 3 arbres par espèce sont présentés dans le tableau 5. Ces résultats permettent de classer le bois du pin d'Alep comme étant un bois à fort retrait volumique ($9 < \beta_v < 13$), à retraits linéaires moyens ($6,5 < \beta_t < 10$; $3,8 < \beta_r < 6,5$), qui le caractérise du bois relativement stable dimensionnellement ($\beta_t / \beta_r < 1,4$).

Tableau 5: Retraits du bois chez 6 provenances Tunisiennes du pin d'Alep.

Provenance	β_r (%)	β_t (%)	β_v (%)	β_t / β_r (%)
Jbel Abderrahmane	5,35	5,39	12,62	0,43
Sodga	4,71	5,30	11,05	0,48
M'guila	6,02	7,16	18,29	0,39
Sakiet	6,28	8,04	22,13	0,36
Selloum	7,40	7,97	19,43	0,41
Dernaia	4,58	5,62	13,66	0,41

3.1.3. Conduite du séchage

On distingue le séchage naturel (à l'air libre) et le séchage artificiel :

Le séchage à l'air libre : c'est un séchage naturel qui présente l'avantage d'être peu brutal pour le matériau bois, du fait de l'alternance du jour et de la nuit, au cours de laquelle l'humidité relative de l'air remonte toujours à une valeur élevée. Il ne nécessite aucune source d'énergie et apparaît relativement simple à mettre en place et à piloter. Par contre, le taux d'humidité final est mal maîtrisé car dépendant des conditions climatiques et météorologiques extérieures. *Via* des études réalisées, il y a quelques années, le bois du pin d'Alep semble réagir de manière assez rapide au séchage naturel. Des échantillons de bois du pin d'Alep tunisien, débités en avivés de 27 mm d'épaisseur, ayant une humidité initiale comprise entre 30 et 40 %, atteignent une humidité finale de 17 % après 35 jours de séchage naturel sous un climat parisien (Dahman, 1986). Les conditions climatiques, suivant lesquelles le séchage naturel est réalisé, jouent un rôle prépondérant dans ce type de procédé. Les conditions climatiques Tunisiennes, sèches devraient permettre de raccourcir le temps de séchage naturel du pin d'Alep. A noter que le séchage du bois du pin d'Alep s'est effectué sans engendrer de déformations ou de fentes profondes sur le matériau. Cependant, une tendance non négligeable, à l'échauffure a été observée chez le pin d'Alep Algérien.

Le séchage artificiel : Généralement, le cycle de séchage artificiel se déroule en cinq étapes : (i) une phase de montée en température, suivie (ii) d'un premier

préchauffage à basse température, (iii) un second préchauffage conduisant à une température intermédiaire, qui constitue la phase de séchage à proprement parler, (iv) un équilibrage et enfin (v) une phase de refroidissement, permettant de redescendre en température jusqu'au niveau de la température ambiante, (figure 4).

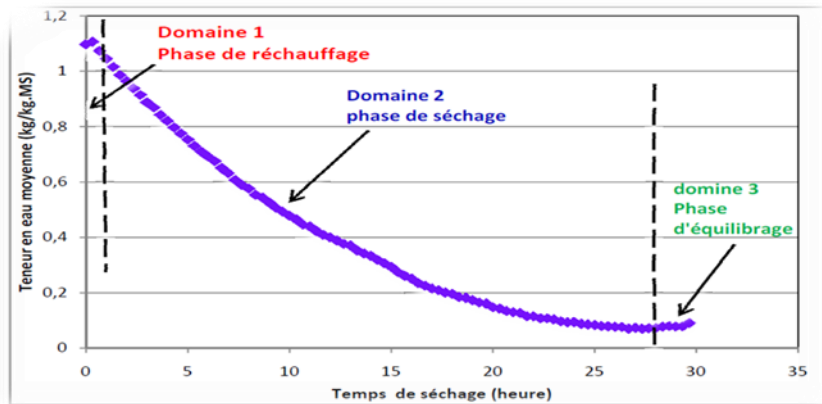


Figure 4: Evolution temporelle de la teneur en humidité du pin d'Alep au cours de son séchage (Bahar, 2012).

Les cinétiques de séchage, par procédé convectif du bois du pin d'Alep en provenance du Nord-Ouest de la Tunisie, ont montré que le couple température-durée est déterminant pour définir les conditions de séchage de ce bois (Bahar *et al*, 2012 ; Ben Dhib *et al*, 2016). Des températures de chauffe, aux alentours de 65-70 °C, ont permis de sécher le bois dans de bonnes conditions. Il suffit ensuite d'adapter la durée de séchage en fonction du taux d'humidité finale du bois souhaité. La cinétique de séchage par air chaud est représentée dans le Tableau 6.

Tableau 6: Table de séchage du bois du pin d'Alep (Bahar *et al*, 2012).

X(%)	Phases	Ts (°C)	HR (%)	X _{éq} (%)
Vert	Montée en température	5 à 10	—	—
Vert	Réchauffage	60	70	12.5
Vert	Séchage	60	65	11.5
35		65	55	*
32		70	55	8.5
30		70	50	7.7
28		70	45	7
25		75	45	*
20		80	40	*
15		80	28	*
—	Equilibrage	80	52	*
—	Refroidissement	—	—	—

En France, une étude conduite par (Robert *et al*, 2016) au FCBA a permis d'établir les règles de séchage de base du pin d'Alep et d'apporter des éléments technico-économiques intéressants, tout en confirmant les résultats présentés précédemment. Il en résulte que le pin d'Alep est une essence qui peut être séchée à des températures avoisinant les 70°C, sans risques majeurs de déformations. Néanmoins, le pin d'Alep semble avoir un bois plus au moins stable pour lequel une trop haute température, associée à un gradient de séchage important, peut engendrer des déformations, ainsi qu'un gauchissement susceptibles de gêner la mise en œuvre de ce matériau. Il conviendra donc de ne pas sécher ce bois à des températures supérieures à 75°C, au risque de ne pas pouvoir utiliser les sciages pour les applications souhaitées.

3.2. Propriétés mécaniques

Depuis plusieurs années, diverses études ont été menées sur la caractérisation des propriétés mécaniques du bois du pin d'Alep en Tunisie. Ces résultats de caractérisation mécaniques constituent la base de données la plus importante concernant les diverses propriétés du bois Tunisien.

Les premiers résultats obtenus par Dahman (1976) montrent que les caractéristiques mécaniques du bois du pin d'Alep de Tunisie sont comparables à celles du bois du pin d'Alep Algérien, même si celui de Tunisie semble avoir des résistances en flexion et en dureté légèrement supérieures. Comparé au pin sylvestre, ayant une densité très proche de celle du pin d'Alep (pin d'Alep $\approx 0,55$; pin sylvestre $\approx 0,62$), les caractéristiques mécaniques du pin d'Alep rapporté à la densité, en particulier vis-à-vis de la rupture en flexion et compression, du cisaillement, du fendage et de la traction perpendiculaire, se révèlent plus élevées. Au contraire, le pin d'Alep a montré une plus faible résistance aux essais de chocs (résistance de rupture aux chocs, 30% inférieure à celle du pin sylvestre). Dahman (1976) a également montré que le bois du pin d'Alep, provenant de peuplements naturels ont de meilleures caractéristiques mécaniques que celles du bois issu de peuplements artificiels (tableau 7) qui est sans doute lié à la vitesse d'accroissement.

Tableau 7: Résultats des essais mécaniques, effectués sur des billes de pied du pin d'Alep (Dahman, 1976).

Caractéristiques	Forêt nat. (Oum Jedour)	Forêt artif. (Dar Chichou)	Forêt artifi (Rimel)	Moyenne
Contrainte de rupture en Méga pascal (MPa)	67,08	37,85	51,78	55,90
Contrainte de rupture en flexion (MPa)	165,63	94,33	140,43	136,21
Module d'élasticité en flexion ((MPa))	13 327	6 884	11 983	11 380
Travail observé au choc (kg/m)	2,09	1,95	1,01	1,79
Contrainte de rupture en traction perpendiculaire (kg/cm ²)	28	29	20	26
Contrainte de rupture en cisaillement (kg/cm ²)	78	73	58	72
Contrainte de rupture en fendage (kg/cm ²),	16,10	10	12	13,55
Chiffre de dureté Monnin (N)	3,75	2,8	1,8	3,03

En conduisant une étude sur 6 provenances du pin d'Alep, provenant du dispositif expérimental de Jbel Abderrahman [Lat, : 36°42', Long, : 10°40'], Elaieb

et al. (2017b) ont trouvé respectivement des valeurs moyennes de contraintes à la rupture en flexion et en compression axiale de 79,5 Mpa et de 75,2 Mpa, ce qui leur a permis de classer le bois du pin d'Alep parmi les essences possédant une résistance moyenne à la flexion et une faible résistance à la compression axiale. A l'opposé Dahman (1986) a signalé que le bois du pin d'Alep résiste bien en compression et en flexion. En ce qui concerne la dureté, le bois du pin d'Alep a manifesté une bonne résistance, surtout pour les parties imprégnées de résine (Dahman, 1976). D'une manière générale, le bois du pin d'Alep de Tunisie possède une cohésion transversale excellente, mais s'est révélé être fragile vis-à-vis des essais de chocs.

D'après les différentes études, citées précédemment, les caractéristiques mécaniques du pin d'Alep semblent être très proches, voire meilleures dans une certaine mesure de celles du pin sylvestre. Pourtant, ses champs d'utilisation et de mises en œuvre se trouvent limités, notamment dans les domaines de la construction et de la menuiserie. La présence de nœuds, ainsi que de poches de résine en sont les principales causes.

3.3. Durabilité naturelle du pin d'Alep

3.3.1. Résistance vis-à-vis des champignons de dégradation de bois

Très peu d'études ont été conduites. Les seuls résultats sur la durabilité naturelle du bois du pin d'Alep, provenant de Tunisie, vis-à-vis des attaques de champignons lignivores, proviennent d'une étude menée par Elaieb *et al.* (2015), Elaieb *et al.* (2017b) et Candelier *et al.* (2015). Les résultats basés sur la détermination des pertes de masse médianes du bois, dues aux dégradations fongiques, ont permis de classer le bois du pin d'Alep Tunisien comme un bois de classe 5 (tableau 8), non durable, en ce qui concerne les champignons *Coniophora puteana* (champignon lignivore saprophyte) et *Gloeophyllum trabeum* (pourriture brune), et comme un bois de classe 4, peu durable, pour le champignon *Poria placenta* (pourriture blanche).

Tableau 8 : Les cinq classes de risque déterminent la situation du bois en service et l'évaluation des risques d'altération biologique.

Classe de risque	Situation en service	Exemples d'emploi	Risque biologique
Classe 1	Bois toujours sec. Humidité inférieure à 20 %	Emplois intérieurs: meubles, parquets lambris, menuiseries et aménagements intérieurs,...	- Insectes - Termites
Classe 2	Bois sec mais dont l'humidité peut occasionnellement dépasser 20 %	Charpente, ossatures correctement ventilées en service	- Insectes - Champignons de surface - Termites
Classe 3	Bois à une humidité fréquemment supérieure à 20 %	Toutes pièces de construction ou menuiserie extérieure soumises à la pluie : bardages, fenêtres,...	- Pourriture - Insectes - Termites
Classe 4	Bois à une humidité toujours supérieure à 20 %	Bois d'extérieur ou en contact avec le sol ou une source d'humidification prolongée ou permanente	- Pourriture - Insectes - Termites
Classe 5	Bois en contact permanent avec l'eau de mer	Piliers, pontons, bois immergés	- Pourriture - Insectes - Térébrants marins

Ces résultats classent donc le bois du pin d'Alep parmi les essences dites non durables (Classe 5). Ces résultats sont similaires à ceux trouvés pour d'autres essences de pins européens, figurant dans la Norme Européenne EN 350 (2016). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus pour le pin d'Alep Français. En effet, Montibus, 2015) a montré que le duramen du pin d'Alep, testé contre l'attaque des champignons *Poria placenta* et *Coniophora puteana* (selon XP CEN / TS 15083-1) est légèrement durable (classe de durabilité 4). Cependant, cet auteur a montré que l'aubier du pin d'Alep possède une classe d'imprégnabilité 1, ce qui lui permet d'être efficacement traité par l'ajout d'un produit de préservation, conférant au matériau une durabilité pouvant aller jusqu'à la Classe 1 (très durable) et permettant ainsi de l'utiliser en milieu extérieur et/ou humide (Montibus, 2015 ; Elaieb, 2017b).

3.3.2. Résistance vis-à-vis des termites

La résistance du bois du pin d'Alep face aux attaques des termites a été très peu étudiée. Les seuls résultats obtenus sont issus d'un travail mené par Elaieb *et al.*(2017b), portant sur la caractérisation du bois de pin d'Alep, provenant de la zone du Maghreb. Via ce travail, des échantillons de bois du pin d'Alep, issus du Maroc, ont été soumis à des essais screening termites (essais rapides, avec quelques ajustements par rapport à la Norme Européenne EN 118). Après avoir été mis en contact huit semaines avec des termites de l'espèce *Reticulitermes flavipes* (ex: *santonensis*), le bois du pin d'Alep s'est avéré être très dégradé (cotation visuelle 4) et avec un taux de survie moyen des termites, égale à 42,4 %. En d'autres termes, ces essais ont permis de classer le pin d'Alep parmi les bois «sensibles», vis-à-vis des termites.

4. Usage industriel du bois du pin d'Alep

En général, le bois du pin d'Alep Tunisien est un bois dont les caractéristiques sont équivalentes à celles du bois du pin maritime (bois rouge). Mais en raison de certains défauts précités dans le bois du pin d'Alep, les industriels préfèrent utiliser du bois dont l'aspect visuel semble plus sain et donc s'orienter vers du bois importé tel que celui du pin maritime. Les études sur les différents types de produits industriels, issus du bois du pin d'Alep en Tunisie sont très anciennes et datent des années 70, Dahman (1976) a trouvé que le bois du pin d'Alep peut se prêter à plusieurs usages:

- ❖ sciages pour la menuiserie grossière ou commune,
- ❖ sciages pour la caisserie,
- ❖ bois de mine,
- ❖ traverses de chemin de fer,
- ❖ excellent bois de trituration, donnant des panneaux de bonne qualité.

Parmi les voies d'utilisation du bois du pin d'Alep identifiées par Dahman (1986), la trituration occupe une place prépondérante (68,5% exploités à cette fin) (tableau 9) et elle est pratiquée depuis 1970 jusqu'à 2014. Depuis cette date, cette pratique est remplacée par la fabrication des panneaux MDF (Medium Density Fiberboard).

Tableau 9 : Pourcentage des produits obtenus dans quatre forêts naturelles du pin d'Alep en Tunisie (Dahman, 1976).

Forêt	Série Parcelle	Volume exploité en m ³	Différents produits en %			
			Sciage	Trituration	Service	Chauffage
Chambi	II/49	260	17,8	76,6	0,6	5,0
	II/42	220	10,4	86,6	1,0	2,0
Semama	III/59	236	22,5	70,0	4,7	2,8
	III/50	639	20,6	70,0	5,0	4,4
Oum Jedou	III/47	138	16,3	81,7	1,7	0,3
	III/44	197	63,9	34,0	0,9	1,2
El Glàa	Unique/6	250	21,4	72,0	6,0	-
	Unique/7	291	36,6	57,5	4,4	1,5
Moyenne		279	26,2	68,5	3,8	1,5

4.1. Bois de sciage

4.1.1. Procédés de première transformation

Le bois du pin d'Alep, provenant de différents sites d'exploitation, a montré de bonnes aptitudes face au sciage. Les opérations de transformation du bois, à l'aide de scie à ruban ou de scie circulaire, s'avèrent faciles et donnent des épaisseurs régulières, quelque soit le type de débit utilisé sur dosse ou sur quartier (Dahman, 1974 ; 1986). Dans ces usinages, réalisés dans la direction longitudinale du bois (suivant le sens des fibres), la production d'éclats et/ou d'arrachements est négligeable, même aux alentours des nœuds. Il en est de même pour les usinages réalisés dans le plan transversal du matériau, où, dans ce cas, on peut observer de très bons états de surface. Les essais effectués à l'aide d'une scie à ruban, comportant des volants de 130 cm de diamètre, ont donné des débits d'épaisseurs régulières sans déviation ni fente.

En mesurant les efforts de coupe au tranchage, Dahman (1989) a également montré que le bois du pin d'Alep de Tunisie se comporte très bien face à ce procédé d'usinage industriel. L'effort de tranchage moyen est en général faible, de l'ordre de 0,35 N/mm. A noter qu'il est régulièrement un peu plus élevé pour les arbres à taux de croissance faible, provenant de peuplements naturels.

Des essais de rabotage ont également montré que le bois du pin d'Alep se travaille très bien avec ce type d'usinage. Lors du rabotage, réalisé dans le sens des fibres, les nœuds présents dans le bois s'usinent sans engendrer d'éclats sur leur périphérie, et ce malgré le contre-fil. Cependant, lors d'un rabotage réalisé dans le sens perpendiculaire aux fibres du bois, un risque d'arrachement a été mis en évidence. Dans l'ensemble, de très bons résultats ont été obtenus en utilisant la scie circulaire, sur des planches de 24 mm d'épaisseur et ramenées à 12-14% d'humidité.

D'après le classement établi selon la norme française (NF B53503), aucun débit ne peut être classé ni en A, ni en B. L'ensemble des débits se répartissent dans les classes inférieures (C, D et E) et ne pourront être utilisés qu'en bois de coffrage, bois de charpente ou, dans les meilleurs des cas, en bois de menuiserie commune. Concernant ce classement, Dahman (1986) a fait remarquer que cette norme est très stricte, si elle est adaptée à des pays disposant d'importantes ressources forestières, elle ne convient pas forcément à d'autres pays tels que la Tunisie, aux ressources forestières de qualité limitée. Une révision de cette norme, qui tiendrait en compte des réalités et des besoins du pays, permettrait, sans aucun doute, d'optimiser le classement de ces bois. Il faut également remarquer que le classement médiocre du bois du pin d'Alep résulte principalement du fait de la présence de défauts physiques (nœuds) au sein du bois, qui peuvent être réduits par l'application de traitements sylvicoles appropriés.

4.1.2. Procédés de seconde transformation

4.1.2.1. Bois de trituration

Cette catégorie comprend tout le bois rond, principalement de moyenne ou de mauvaise qualité, qui est rejeté par le tri effectué au préalable d'une valorisation du bois en tant que bois de sciage (Selmi, 1976). La seule limitation est le degré de pourriture, qui ne doit pas dépasser 20 %, pour la pourriture molle et 80 %, pour la pourriture due aux champignons basidiomycètes. Le calibre du bois et les autres défauts sont sans importance.

4.1.2.2. Pâte à papier

A l'échelle industrielle, le bois du pin d'Alep trouve des débouchés certains pour la fabrication de pâte à papier. Les paramètres (indice de feutrage et le coefficient de souplesse (Cf 2.3)), qui déterminent les possibilités d'un tel emploi, sont à l'avantage quant à son utilisation dans une telle industrie. Les valeurs obtenues sont élevées et sont donc très favorables à l'emploi du bois du pin d'Alep en papeterie. Malheureusement, la seule usine de cellulose en Tunisie, base son activité de production de pâte uniquement sur l'alfa.

4.1.2.3. Bois de service

En Tunisie, la catégorie de bois de service regroupe les utilisations du bois du pin d'Alep en tant que piquets ordinaires, de perches et de tuteurs.

- **Les piquets ordinaires**

Selon le calibre du bois, les piquets obtenus sont classés suivant deux catégories, PO1 (5 cm < diamètre fin bout < 10 cm) et PO2 (11 cm < diamètre fin bout < 15 cm). Le bois de mines, déclassé, représente la principale ressource pour une utilisation en piquets. Cependant, les critères de sélection du bois sont

assez stricts. Même si la présence de fibre torse est admise au sein du matériau utilisé, ce dernier doit être exempt de présence de pourritures, de fentes ou de fissurations et de piqures profondes. Une fois le bois du pin d'Alep transformé, les piquets doivent être assez droits, ce qui se caractérise par une flèche maximale, autorisée pour la mise sur le marché de ces produits, de 5 cm par mètre linéaire et/ou de 12 cm sur toute la longueur du poteau.

- **Les perches**

Comme pour les poteaux, les perches sont réparties en deux classes, en fonction de leurs diamètres «gros bout», P1 (8 cm < diamètre gros bout < 14 cm) et P2 (15 cm < diamètre fin bout < 20 cm). La principale ressource en pin d'Alep, utilisée pour la fabrication industrielle de perches est constituée principalement de produits issus de la gestion forestière, comme le bois d'éclaircie de faible diamètre. Les perches, obtenues à partir du pin d'Alep, sont essentiellement utilisées dans le domaine de l'horticulture et plus rarement pour la réalisation d'échafaudages ou pour la construction de logements ruraux.

- **Les tuteurs**

Le bois du pin d'Alep, de très petits calibres, que ceux cités précédemment (< 4 cm) sont utilisés en tant que tuteurs en culture maraîchère. Selon leurs dimensions, on peut les classer selon 3 classes : TU2 ($\varnothing=2\text{cm}$), TU3 ($\varnothing = 3 \text{ cm}$) et TU4 ($\varnothing = 4 \text{ cm}$). La longueur exigée pour ces produits est, quant à elle, de 1 m minimum, quelle que soit leur classification. D'une manière générale, les tuteurs sont façonnés à partir de jeunes arbres et de branches d'arbres du pin d'Alep, arrivés à maturité. Comme pour les piquets, le bois constituant ces tuteurs doit être sain de tout type de pourriture. La flèche maximale, autorisée pour la mise sur le marché de ces produits, est, quant à elle, de 10 cm, sur toute la longueur des tuteurs. L'imprégnation de ces produits par des agents de préservation pourrait rendre leur utilisation plus durable, surtout dans les clôtures, les jardins publics, etc.

4.1.2.4. Bois de feu

Cette catégorie regroupe le bois qui est destiné vers un usage énergétique, soit par une transformation *via* des procédés de carbonisation, soit directement utilisé en tant que bois de chauffage (boulangerie, bain maure, et toutes autres utilisations domestiques). Généralement, la ressource utilisée est représentée par du bois de petites dimensions, présentant des défauts (pourritures, parasites, etc.), mais aussi du bois issu des résidus d'exploitation forestière (bois secondaires, bois de souches, bois morts, etc.). Les biomasses, servant comme bois de chauffage, sont classées en différentes catégories: bois de gros diamètres, bois de souches, bois morts, bois incendiés (de moins et de plus d'un an) D'après Dahman (1989), le bois du pin d'Alep présente de bonnes aptitudes à la conversion en tant que bois de chauffage.

1. Voies potentielles de valorisation industrielle du bois du pin d'Alep

1.1 Essais de traitement thermique par pyrolyse douce

Le traitement thermique du bois par pyrolyse douce (pyrolyse réalisée à des températures comprises entre 180 et 240°C, en absence d'oxygène) confère de nouvelles propriétés au matériau bois : amélioration de la stabilité dimensionnelle, amélioration de la résistance fongique, changement de couleur, augmentation de l'hydrophobicité, mais qui peuvent être accompagnées de dégradations des propriétés mécaniques. Ce procédé peut être considéré comme étant une alternative écologique aux procédés d'imprégnation de biocides chimiques, couramment utilisés.

Des essais de traitement thermique ont été réalisés par Elaieb *et al.* (2015) au Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Matériaux bois (LERMAB, Université de Lorraine – Nancy, France), sur des planches du pin d'Alep, provenant de la région de Ain Draham (36° 46' 34" N, 8° 41' 05" E) dans le Nord-Ouest de la Tunisie. Le traitement a été effectué dans un four pilote (figure 5),

conçu par le LERMAB et a permis d'obtenir des produits très différents en fonction des traitements selon l'intensité des températures utilisée (figure 6).

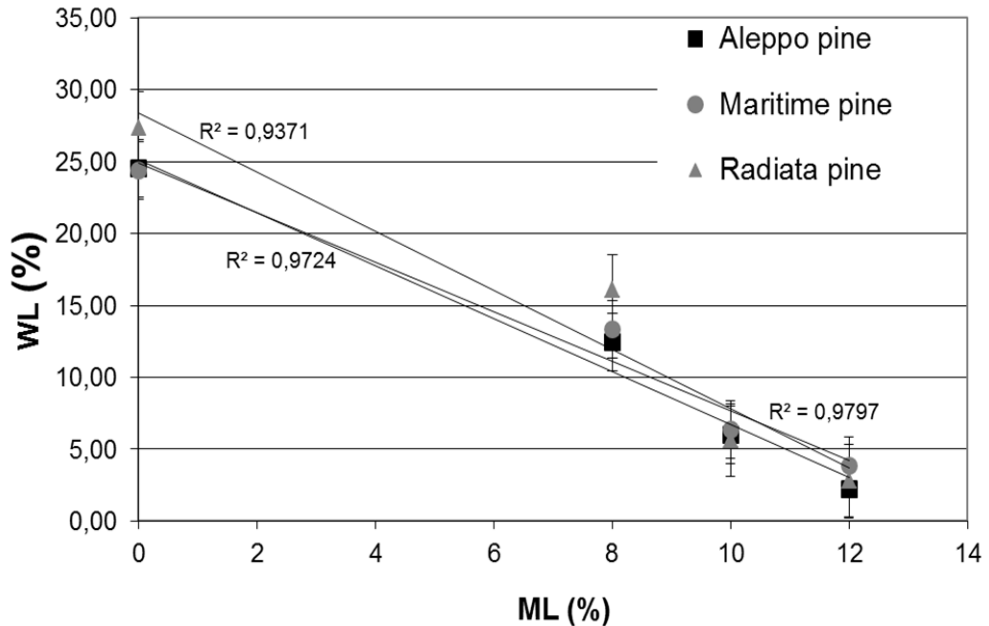


Figure 5: Processus du traitement thermique dans le four pilote.



Figure 6: Bois du Pin d'Alep modifié thermiquement sous différentes conditions de traitement (1 : témoin, 2 : 8% de perte de masse, 3 : 10% de perte de masse, 4 : 12% de perte de masse) (Elaieb *et al*, 2015).

La durabilité du bois du pin d'Alep traité thermiquement a été nettement améliorée et le bois traité s'est très bien comporté face aux modifications thermiques (aucune fissuration, coloration homogène, etc.). Par rapport, aux attaques fongiques, le bois du pin d'Alep traité à des températures supérieures à 210°C s'est montré plus résistant, comparé au bois non traité (figure 7).



(WL=Perte de masse due à l'attaque fongique / ML= Perte de masse due à la thermodégradation)

Figure 7 : Durabilité du bois tunisien, modifiés thermiquement.

Par ailleurs, le traitement par pyrolyse douce peut constituer une voie de valorisation fort intéressante pour le bois du pin d'Alep Tunisien, surtout en milieu extérieur, en évitant de le soumettre à de fortes charges et à des efforts mécaniques importants (lames de terrasses, bardages, mobilier extérieur, piscine, etc.).

1.2 Essais d'amélioration par trempage dans des solutions aqueuses

La valorisation, par déroulage du bois du pin d'Alep, en vue de la fabrication de panneaux de structure de type LVL (Laminated Veneer Lumber) ou de contre plaqués, se heurte à deux caractéristiques défavorables, liées aux propriétés de son duramen :

- son humidité à l'état vert, est proche du point de saturation des fibres (entre 30 et 40%),
- son hydrophobicité, qui le rend très difficilement imprégnable.

Ces propriétés défavorables rendent le procédé de pré-traitement, par bouillottage à l'eau, avant le déroulage, long et délicat, Du fait de son caractère hydrophobe et de son taux d'humidité à l'état vert, assez faible, le temps d'étuvage nécessaire pour imprégner le bois avec de l'eau chaude (bouillottage), est doublé, voire même triplé, par rapport à celui d'autres essences plus humides. Cela se traduit par un gaspillage énergétique et une immobilisation de stocks accrue (Elaieb *et al*, 2017 a).L'amélioration de l'imprégnabilité du duramen du pin d'Alep d'une manière homogène a été réalisée par deux techniques :

- ✓ La technique habituelle de bouillottage, par immersion dans l'eau naturelle ou améliorée (ajout des tensio-actifs), en faisant varier principalement deux paramètres : la température et la durée d'immersion ;
- ✓ La technique des ultrasons, en faisant varier seulement la température.

Ces techniques se présentent comme des solutions industrialisables, reproductibles et peu onéreuses, pour une meilleure exploitation industrielle du bois du pin d'Alep en Tunisie.

Le duramen du pin d'Alep demeure très difficile à imprégner à l'eau. Il a tout de même été constaté que les cinétiques d'imprégnations du pin d'Alep sont fonction de la température et du temps du traitement. La technique, utilisant des cycles d'immersion chaud/froid du bois, permet également d'augmenter le taux d'humidité du bois. L'ajout de substances tensio-actives, dans l'eau d'immersion améliore également la qualité d'imprégnation du duramen de pin d'Alep (Elaiebet *al*, 2017b).

Conclusion

Le parcours d'une documentation relativement assez abondante mais, pour la plupart, très ancienne, nous a permis de tirer des renseignements très utiles en ce qui concerne les potentialités du bois du pin d'Alep et des débouchés possibles quant à sa valorisation et à son utilisation à l'échelle de la Tunisie.

Cependant, certaines études restent exploratoires et nécessitent ainsi d'être approfondies.

Au vu des résultats compilés, le bois du pin d'Alep se place parmi les bois mi-dur à mi-lourd qui présente de bonnes caractéristiques mécaniques, mais qui est, cependant, fragile et cassant aux effets de chocs. Son retrait volumétrique est moyen et sa durabilité naturelle est faible. Il s'agit donc d'un bois qui s'usine et sèche naturellement sans problèmes particuliers.

Son handicap majeur, le restreignant aujourd'hui à peu de domaines d'utilisation et d'emplois, consiste principalement en la présence des nœuds, en nombre important, parfois très gros et qui le dévalorisent mécaniquement et surtout visuellement (Polge, 1992). La présence de tels défauts, résulte d'un mauvais traitement et d'une mauvaise conduite sylvicole sur les jeunes arbres (mutilations, enlèvement de tanin et bois gras, imprégnations du bois par des écoulements de résine, etc.). Une telle conduite a abouti dans la plupart des cas à la formation de peuplements constitués, en grande partie, d'arbres tordus, fourchus à fûts courts, ce qui entraîne des pertes, en rendement matière, très importantes dès leur abatage. Jusqu'à aujourd'hui, le bois du pin d'Alep fraîchement abattu, est stocké sur place en forêt, ce qui l'expose régulièrement à diverses attaques fongiques, biologiques, mais aussi au bleuissement.

La forme générale du fût, qui est dans la plupart des cas tordu, rend le procédé de sciage difficile à mettre en œuvre, augmentant ainsi le temps nécessaire à l'usinage et donc le coût du procédé. De plus, la méthode de séchage adoptée au pin d'Alep, est le séchage à l'air libre. Cette solution unique de séchage a en quelque sorte un impact financier élevé, du fait de la surface importante nécessaire au stockage du bois. Pour ces raisons, les industriels locaux, travaillant à partir des ressources en pin d'Alep, préfèrent transformer le bois en matériau utilisé dans les industries de palettes et d'emballage, ou encore le transformer en pellets pour une valorisation énergétique. Grâce à son pouvoir énergétique élevé deux unités de transformation du bois du pin d'Alep en granules énergétiques ont commencé à fonctionner depuis 2014 (CTIBA, 2016). La demande des pays d'Europe est en pleine croissance. Selon des travaux

réalisés par France Pellets en 2006, l'équivalent énergétique d'un kg de pellet est de 18MJ/kg (environ 5kwh). Cette dernière voie de valorisation, constitue actuellement la principale utilisation du bois du pin d'Alep en Tunisie.

Le taux de résine exceptionnel qui existe dans cette essence qui s'élève à 4,5 1 % (Thibaut *et al*, 1992) pourrait constituer une source importante de gemme, c'est-à-dire l'essence de térébenthine et la colophane qui intéressent beaucoup les industries surtout ceux de peinture. Le taux de résine chez le pin d'Alep varie radialement dans l'arbre. En effet, dès que l'on dépasse la moitié du rayon, la teneur en résine du bois situé vers l'écorce reste toujours inférieure à 5%, par contre dans le quart le plus à cœur, le taux moyen de résine dépasse 10% avec des pointes voisines de 30% (Thibaut *et al*, 1992). Ce résultat est tout à fait comparable à ce qui a été observé sur le pin maritime par Keller (1973) qui trouve un taux moyen de résine de 12% pour des jeunes arbres de 6 ans. Cela prouve par ailleurs que la production normale de résine dans le bois de ces pins ne résulte pas du processus de duraminisation.

Le pin d'Alep reste une importante ressource forestière et peut occuper une place prépondérante dans l'économie Tunisienne, à condition que les forestiers arrivent à corriger les défauts de son bois, notablement par une amélioration génétique associée à la pratique d'une sylviculture mieux appropriée.

Par ailleurs, l'obtention de meilleures qualités, rivalisant avec celles d'autres bois comparables et couramment utilisés, exige la révision des procédés d'exploitation et l'adoption d'une classification qui soit basée, d'une part sur les qualités réelles de cette essence et d'autre part sur les besoins des utilisateurs. Il est tout à penser qu'une classification plus réaliste, une innovation dans les procédés de traitement et de transformation et une révision des prix à l'acquisition ne feront que revaloriser les produits issus de cette essence forestière et remédier aux préjugés défavorables, ayant fortement marqué les esprits pendant de nombreuses années.

Références bibliographiques

- Bahar R., 2012 - Caractérisation physique et études cinétiques de séchage convectif du bois résineux. Mémoire de Master, Physique des fluides et des transferts. Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie, 78p.
- Bahar R., Ouertan S., Azzouz S., Elaieb M.T., Elcafci A., 2015 - Isotherme de désorption et propriétés thermodynamiques du bois résineux : pin d'Alep, pin pignon et pin brutia. 3^{ème} Séminaire Magrèbin sur les Sciences et les Technologies du Séchage (SMSTS'2015, Ouargla, Algérie, 22 au 24 Novembre 2015).
- Ben Dhib K., 2016 - Étude expérimentale des procédés de séchage du bois : séchage convectif et séchage par contact sous vide et sous pression. Thèse de doctorat en physique, Université de Tunis El Manar, Faculté des sciences de Tunis, Tunisie, 137p.
- Ben Dhib K., Elaieb M.T., Azzouz S., Elcafci A., 2016 - Behavior of Tunisian Aleppo Pine wood during convective drying: Identification of the diffusion coefficient taking into account shrinkage velocity, *J, Mater, Environ, Sci*, 7 (7) (2016) 2561-2571.
- Christel R., Thierry O., 1995 - Valorisation du bois de pin d'Alep. Etude bibliographique (PFE G3), Ecole des Arts et Metiers, Centre de Paris.
- Candelier K., Hannouz S., Elaieb M.T., Collet R., Dumarçay S., Pétrissans A., Gérardin P., Pétrissans M., 2015 - Utilization of temperature kinetics as prediction's way to treatment intensity and corresponding treated wood quality: durability and mechanical properties, *Maderas-CiencTecnol*, Vol 17, N° 2, 2015.
- Dahman M., 1974 - Le Pin d'Alep: Ses qualités technologiques et son utilisation. Bulletin d'information n°17. L'institut National de Recherche Forestières, 9-12p.
- Dahman M., 1976 - Education et Formation Forestière. Rapport de mission, Projet PNUD-FAO « » MOR 68/519, 32p.
- Dahman M., 1986 - Les produits du pin d'Alep en Tunisie, Série études – C.I.H.E.A.M 86/1, Options méditerranéennes, p 157-161.
- Dahman M., 1989 - Production et technologie des produits de la forêt tunisienne. Séminaire I.U.F.R.O du groupe P501 « Propriétés et Utilisation des bois tropicaux » ABIDJAN (Côte d'Ivoire)- 19 au 25 Novembre 1989, 20p.
- DGF (Direction Générale des Forêts), 2010 - Résultats du deuxième inventaire forestier et pastoral national. Inventaire des forêts par télédétection. Ministère de l'Agriculture, Tunis, 180 p.
- Dilem A., 1992 - Déterminisme de quelques propriétés de base du bois de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), conséquences sur la sélection, la sylviculture et l'évaluation de la qualité de la ressource. Thèse de doctorat à l'INPL (France).
- Elaieb M. T., Aloui F., Khouja M. L., 2010 - Etude des propriétés physico-mécaniques du bois de pind'Alep en fonction de la provenance et de la densité du peuplement, 1er Colloque International sur les Ressources Sylvo-Pastorales et Développement Durable en Méditerranée, Tabarka, 19-20 et 21 Octobre 2010.
- Elaieb M.T., Candelier K., Pétrissans A., Dumarçay S., Gérardin P., Pétrissans M., 2015 - Heat treatment of Tunisian soft wood species: effect on the durability, chemical modifications and mechanical properties, *Maderas-CiencTecnol* Vol 17, No 4.

- Elaieb M.T., Khouaja A., Marchal R., Gourvez T., Petrissans M., 2017a - Essais d'amélioration de l'imprégnabilité à l'eau du duramen de pin d'Alep, Vol 29, Numéro 2. Les Annales de l'INAT.
- Elaieb M.T., Shel F., Elouellani S., Janah T., Rahouti M., Thevenon M.F., Candelier K., 2017b, Physical, mechanical and natural durability properties of reforestation *Pinus halepensis* Mill, wood from the Mediterranean basin, Bois et Forêts des Tropiques, 2017, n° 331 (1); 7-19p.
- EN118, 2005. Wood preservatives. Determination of preventive action against Reticulitermes species (European termites) (laboratory method).BSI Standards Publication, 22 p.
- EN 350, 2016 - Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials,BSI Standards Publication, 72p.
- Greguss P., 1954 - Origine et Evolution des Coniferophytes. VIII. Congr. Intern. Bot. Paris.
- Haddad A., Lachenal D., Marechal A., Janin G., Labiod M., 2009 - Delignification of Aleppo Pine wood (*Pinus halepensis* Mill.) by soda-anthraquinone process: pulp and paper characteristics. Cellulose Chemistry and Technology, 43 (7-8): 287-294.
- Keller R., 1973 - Caractéristiques du bois de pin maritime, variabilité et transmission héréditaire. Annales des Sciences Forestières, 30 (1).
- Keller R., 1994 - Le bois matériau d'ingénierie. Association pour la recherche sur bois en Lorraine.38p.
- Khouja M.L., 1997 - Variabilité géographique du Pin d'Alep en Tunisie, Perspectives d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois. Thèse de doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université Catholique de Louvain, Belgique, 181p.
- Malkh B., 2001- Evolution des descripteurs morphologiques et des propriétés du bois en fonction des paramètres de croissance chez *Pinus halepensis* Mill et *Pinus brutia* Ten : étude sur un dispositif de comparaison de provenances âgé de 21 ans Thèse ENGREF en sciences forestières et du bois Montpellier.
- Montibus M., 2015 - Détermination de la durabilité et de l'imprégnabilité du pin d'Alep. FCBA Info, décembre 2015, 45, 7p.
- Nahal I, 1962- Le pin d'Alep. Etude taxonomique phytogéographique, écologique et sylvicole. Annales de l'école nationale des Eaux et Forêts , 19, (4) , p 533 – 627.
- Nasr Z., 2012 - Etude des caractéristiques physicomécaniques des résineux : Cas du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et du pin brutia (*Pinus brutia*) de l'arboretum de Jbel Abderrahmane. Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie, 45p.
- Polge H., Keller R., 1970 - Rapport de mission de consultants F.A.O, en Tunisie, I.N.R.A ; C.N.R.F, Station de recherches sur la qualité des bois, I.N.R.A, Nancy, 52p.
- Polge H., 1992 - Le bois de pin d'Alep. Forêt méditerranéenne, t. XIII, n° 3, 234-237.
- Quiquandon B., 1966 - Etude du bois de pin d'Alep de Tunisie. Publication C.T.B, Paris XII, 19p.

Robert G., Lozach D., Lanvin J.D., 2016 - Etablissement des règles de base du séchage du pin d'Alep et premiers éléments technico-économiques, Rapport Final Projet B01248, FCBA, Juin 2016, 24p.

Selmi M T., 1976 - Utilisation mécanique et chimique du bois (et de la gemme) de Pin d'Alep. Thème personnel, I.N.G.R.E.F, Nancy, 32p.

Thibaut B., Loup C., Chanson B., Dilem A., 1992 - La valorisation du pin d'Alep en zone méditerranéenne française. Forêt méditerranéenne t. XIII, n° 3, juillet 1992.

France pellet, 2006.

<http://www.france-pellets.com/wdbox/pagescli/FRANCEPELLETS/quisommesnous.htm>.

CHAPITRE 15

Avantages socio-économiques de la forêt du pin d'Alep

Hamed Daly-Hassen¹ et Abdelaziz Ayari²

Institut National de Recherche Agronomique de Tunisie

²*Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), B.P. 10, 2080 Ariana
Université de Carthage, Tunisie*

Email: hamed.daly1@gmail.com; abdelazizayari@yahoo.fr

Résumé. La forêt du pin d'Alep offre un ensemble de biens et services pour la société tunisienne (protection des sols, rétention des sédiments) et la communauté globale (séquestration du carbone) ainsi que des avantages socio-économiques aux populations locales. La population locale est estimée à 220.000 habitants environ dans les quatre gouvernorats concernés par l'étude (Zaghouan, Siliana, Kef et Kasserine). Une bonne partie (43%) du revenu de ces populations (1028 DT par habitant en 2012) provient des activités liées à la forêt, ce qui démontre sa dépendance aux ressources forestières pour leur subsistance. Parmi les activités contribuant à ce revenu, on cite l'élevage (55%), la carbonisation (16%), l'emploi saisonnier dans les chantiers forestiers (15%) et la vente des produits forestiers non ligneux (13%). Toutefois, cette population reste largement affectée à la fois par la pauvreté et par le chômage. Pour cela, il convient de réfléchir à la mise en place d'une stratégie efficace visant à améliorer le revenu à travers une exploitation soutenable et une valorisation des ressources forestières. En général, l'ensemble de biens et services fournis à la société tunisienne (protection des sols, rétention des sédiments) et la communauté globale (séquestration du carbone) présente une valeur économique totale de 180 DT/ha - prix de 2016. Cette valeur bénéficie à la population locale en premier lieu (59%), à la société tunisienne (17%), à la communauté globale (15%) et à l'Etat (9%). Le présent travail met l'accent sur la faiblesse des revenus de la population locale ainsi que leur dépendance aux ressources forestières particulièrement, la production des graines de zgougou, des ressources en bois ainsi que la production fourragère. En conclusion, la réorientation des aménagements vers la production des bénéfices précédemment cités en faveur de la population locale ainsi que la société tunisienne et la communauté globale a été recommandée. L'adoption d'une approche de coordination d'actions privées et publiques est fortement conseillée. Cette approche multi-acteurs avec la participation des populations locales au niveau des filières visant l'adéquation entre l'offre et la demande, la sécurité d'approvisionnement des entreprises, la certification et l'attribution d'une appellation d'origine, le soutien des initiatives de marketing, accompagnée d'outils de gestion et d'exploitation durable des ressources contribuera à améliorer les revenus.

Mots clés: Pin d'Alep, population locale, valeur économique, biens et services.

Abstract. Socio-economic benefits of the Aleppo pine forest. The Aleppo pine forest is widely known for providing a set of ecosystem goods and services for the society (soil

protection, sediment retention), the global community (carbon sequestration) and the state, with a total economic value estimated to 180 DT/ha based on 2016 prices. This value benefits mainly to local population (59%), to national population (17%), global community (15%) and the Tunisian budget (9%). The Aleppo pine forest provides also socio-economic benefits for local populations. The concerned local population is estimated to 220,000 inhabitants, located in four Tunisian districts (Zaghouan, Siliana, Kef and Kasserine). The larger part of the household's income (43%), estimated to 1,028 Tunisian Dinars per inhabitant in 2012, is provided by forest-related activities, proving the dependence of local population on forest resources for subsistence. These activities are livestock breeding (55%), carbonization (16%), forestry seasonal employment (15%) and non-wood forest products selling (13%). However, this rural population remains largely affected by poverty and unemployment. Yet, developing an effective strategy to improve the households' income can be reached through a multi-actor management approach, based on sustainable forest resources exploitation. The present chapter focuses on the local population' low income and their dependence on forest resources, mainly; zgougou seeds production, timber resources and fodder production. Finally, forest management should be directed towards promoting benefits for local population, national and global communities, rather than only technical conservation and reforestation objectives. As a conclusion, the reorientation of development tools towards the production of the benefits previously mentioned in favor of the local population as well as the Tunisian society and the global community was recommended. The adoption of a coordination approach for private and public actions is strongly indicated. This multi-actor management approach will help improving incomes through a better use of resources and involvement of local population at different levels: the supply chain, security of supply for companies, certification and the attribution of a designation of origin, and supporting marketing initiatives.

Keywords: Aleppo pine, local population, economic value, goods and services.

1. Introduction

Les forêts en général fournissent plusieurs avantages à la société à travers les différentes activités économiques créées en termes d'emploi et de revenu généré de l'usage, de l'exploitation et de la transformation des produits forestiers, ainsi que des bénéfices liés à la régulation de l'eau et du climat, et de protection des sols (FAO, 2014). En Tunisie, les forêts de pin d'Alep fournissent une multitude de produits, à savoir le bois, les graines (zgougou), les huiles essentielles (notamment de romarin), le miel, le fourrage, les tanins (Dahman, 1986), mais aussi d'autres produits et services non marchands entre autres la protection des barrages contre la sédimentation. L'estimation de ces avantages

nécessite une bonne connaissance de la production et de l'utilisation des biens et services et de leurs bénéficiaires, de la population utilisatrice des produits forestiers, et des revenus générés par les activités forestières contribuant à satisfaire les différents besoins. Pour cela, l'approche des biens et services écosystémiques qui s'intéresse à la contribution des écosystèmes au bien être humain est souvent utilisé comme cadre d'évaluation. Ceci aidera notamment les décideurs à définir les priorités en matière de reboisement notamment dans les terres privées.

Ce chapitre présente les avantages économiques et sociaux des forêts du pin d'Alep. L'importance de ces forêts dans l'économie locale est d'abord abordée à travers la dépendance des habitants résidant à l'intérieur / à proximité de ces forêts vis-à-vis des produits forestiers. Afin de montrer l'importance de ces forêts à l'échelle nationale, certains indicateurs sur la production et les usages des principaux produits (bois, graines (zgougou) et pâturage) ont été par la suite estimés. Ce chapitre traite aussi la valeur économique des biens et services fournis par ces forêts. Par ailleurs, la question de rentabilité économique des plantations de pin d'Alep, première espèce de reboisement en Tunisie, a été enfin abordée.

2. Caractéristiques des habitants résidant à l'intérieur / à proximité des forêts et leur dépendance vis-à-vis des produits forestiers

La population forestière est le premier bénéficiaire de la forêt du pin d'Alep. Elle bénéficie des droits d'usage indiqués dans le Code forestier comme le pâturage et le prélèvement du bois mort. De même, elle peut acheter le droit d'exploitation de certains produits forestiers (cônes de pin d'Alep, caroubes, bois de feu, etc.) au tarif des menu-produits fixé par la régie d'exploitation forestière (REF). En plus, la REF et les entreprises d'exploitation dépendantes font souvent appel à la population locale pour les travaux de gestion et d'exploitation des produits forestiers. L'administration fait aussi appel à la population locale pour le

gardiennage, les travaux de plantation sylvo-pastorale, l'entretien des pistes et des pare-feux, la clôture et la protection des zones protégées etc.

De plus, certains habitants sont impliqués dans la fabrication et la distribution d'huiles essentielles, l'extraction et la vente de graines de pin d'Alep et de caroubes, l'apiculture, et la fabrication d'objets d'art en bois, de plus de l'exploitation (légale ou illégale) du bois pour la fabrication du charbon.

Afin d'accroître l'implication de la population locale en tant que partenaire de l'administration, il y a eu plusieurs tentatives de faire impliquer la population locale, à travers les associations forestières d'intérêt collectif, puis les Groupements de Développement Agricole (GDA), dans la gestion et l'exploitation des ressources, les activités éco-touristiques autour des parcs nationaux (Jbel Serj, Jbel Chaambi). Le GDA permet de jouer l'intermédiaire entre l'administration forestière et la population locale pour organiser la récolte de bois par exemple sans occasionner des dégâts à la forêt.

La population usagère des forêts (habitant dans un rayon de 5 km de la forêt) a été estimée pour les différents gouvernorats forestiers en 2010 à 750884 habitants (Tounsi et Ben Mimoun, 2012). En l'absence d'information ciblée sur les habitants des régions couvertes par les forêts du pin d'Alep, nous avons considéré les caractéristiques des habitants de quatre gouvernorats : Zaghouan, Siliana, Kef et Kasserine, dont les forêts sont constituées en grande majorité de forêts de pin d'Alep. La superficie totale des forêts de pin d'Alep selon le dernier inventaire forestier (DGF, 2010) a été estimée à 356.000 ha. Les quatre gouvernorats cités couvrent ensemble 88% des peuplements.

Le nombre des usagers des forêts dans les gouvernorats précédemment cités est estimé à 222.600 habitants, soit 21% de leur population totale (Tableau 1). La plupart des habitants résident dans des douars aux alentours des forêts (97%), à une distance moyenne entre 1 et 2 km.

Tableau 1. Caractéristiques de la population forestière dans les gouvernorats de Kasserine, Kef, Zaghouan et Siliana.

Gouvernorat	Nombre d'habitants des forêts	Nombre de ménages	% de la population	Forêts (ha)	Surface forest./ ménage (ha)	Revenu moy./ habit (DT)	Part du revenu forestier (%)	Chepte (têtes/ha)
Kasserine	74325	14020	17%	148619	10,6	788	34	2
Kef	67518	14503	28%	100940	7,0	1195	31	7
Zaghouan	48110	9456	27%	65839	6,7	960	48	3
Siliana	32659	6523	15%	115133	17,7	1169	58	2
S/Tot.	222612	44502	21%	430531	9,7	1028	43	3
Tot. pays	750884	154538	7%	852891	5,6	905	38	7

Source : Tounsi et Ben Mimoun, 2012

Cette population d'utilisateurs est affectée à la fois par la pauvreté, avec des taux de pauvreté largement supérieurs à la moyenne nationale (20% en 2010) avec 57% à Kasserine, 33% à Siliana et 30% au Kef et à Zaghouan, et par le chômage (Kasserine (34%), Kef (30%), Siliana (29%) et Zaghouan (28%)). Les chefs de ménage sont principalement des ouvriers à Kasserine (45%), au Kef (66%), alors qu'ils ne sont que 31% à Siliana, où l'on peut trouver les agriculteurs (19%) et autres occupations (28%) (Tounsi et Ben Mimoun, 2012).

Le nombre des journées de travail effectuées en 2016 dans les chantiers forestiers des gouvernorats de Zaghouan, Siliana, Kef et Kasserine correspond à l'emploi partiel de l'équivalent de 14069 personnes en considérant une moyenne de 80 jours/an par personne, soit 32% du nombre de ménages usagers de la forêt (Tableau 2).

Tableau 2. Structure du revenu forestier dans les gouvernorats de Kasserine, Kef, Zaghouan et Siliana en 2010.

Gouvernorat	Elevage	Chantiers forestiers	Charbon	Autres PFNL *
Kasserine	73	23	1	3
Kef	87	8	0	5
Zaghouan	24	8	50	18
Siliana	37	22	15	26
Moyenne	55	15	16	13

Source : Tounsi et Ben Mimoun, 2012

* PFNL : Produits forestiers non ligneux

Le revenu moyen annuel dans ces quatre gouvernorats est de 1028 DT/habitant, soit l'équivalent au tiers de la moyenne nationale (cf. Tableau 1). Le plus faible revenu par habitant a été noté à Kasserine (788 DT/habitant), tandis que les revenus les plus élevés sont enregistrés aux Gouvernorats de Siliana (1169 DT/habitant) et du Kef (1195 DT/habitant). Ceci peut être expliqué par l'exploitation de certaines ressources forestières telles que l'extraction des graines du pin d'Alep pour Siliana et l'élevage pour le Kef. Selon Tounsi et Ben Mimoun (2012), une bonne partie de ce revenu (43%) provient des activités liées à la forêt, ce qui démontre la dépendance de cette population aux ressources forestières pour leur subsistance. Parmi les activités contribuant au revenu forestier on cite : l'élevage (55%), la carbonisation (16%), l'emploi saisonnier dans les chantiers forestiers (15%) et la vente des produits forestiers non ligneux (13%).

Le taux de pauvreté, la faiblesse des revenus et le chômage expliquent la grande dépendance des populations aux ressources forestières pour leur subsistance. Cependant la pression humaine sur les ressources forestières, appréciée à travers la surface forestière par ménage, est assez forte au Kef et à Zaghouan, soit 7 ha par ménage. Dans le même contexte, la pression du cheptel sur les forêts est élevée. Au Kef, par exemple, la pression du cheptel est estimée à 7 têtes de cheptel, ovins essentiellement /ha contre 2-3 têtes/ha dans les autres gouvernorats.

Il faut signaler que la population forestière est touchée par des phénomènes de migration définitive ou temporaire dans plusieurs régions ; une bonne partie de la population interviewée pense migrer vers d'autres régions du pays (31% à Kasserine, 24 % à Siliana). Dans ce sens, entre 1994 et 2004, la population a diminué de 3% à Sidi Morched et de 17% à Sidi Hmada dans des zones couvertes par les forêts du pin d'Alep à Siliana.

3. Production et usage des produits issus des forêts du pin d'Alep

Cette section présente en détail l'exploitation et la production des différents produits du pin d'Alep. La résine a été aussi exploitée avant les années 1980, la production a été estimée entre 1,5 kg et 1,8 kg de gemme par arbre et par an (Dahmane, 1986). Actuellement, le gemmage a été complètement délaissé malgré qu'il constitue une source de revenu additionnel.

3.1. Bois

Les prélèvements du bois des forêts du pin d'Alep a été variable dans le temps. Selon Boudy (1948), les forêts du centre ont été inexploitées jusqu'en 1914, puis, elles ont été exploitées pour fournir du bois aux sociétés minières donnant annuellement 100.000 mètres linéaires d'étais et 10.000 stères de chauffage. Pendant la seconde guerre mondiale, les exploitations ont été intensifiées pour contribuer au ravitaillement de l'armée et de la population civile, avec des conséquences sur l'appauvrissement des massifs. De 1939 à 1946, la forêt de pin produisait 27000 m³ de bois d'œuvre, 900.000 mètres linéaires d'étais, en plus du bois de chauffage (184.000 stères) et de charbon de bois (320.000 stères). Après l'indépendance, les prélèvements de bois ont été intensifiés notamment pour subvenir au bois de chauffage, en plus, pour assurer l'approvisionnement des usines de panneaux de particules et de fibres.

Le volume de bois sur pied des peuplements du pin d'Alep est estimé à 25 m³/ha seulement, l'accroissement annuel en bois est aussi faible, soit 0,45 m³/ha/an selon le premier inventaire (DGF, 1995). Sur la base de cet accroissement, la production potentielle de bois a été estimée par Daly-Hassen (1998) à 22.000 m³/an de bois d'œuvre et à 55.000 m³/an de bois de trituration annuellement et d'un volume équivalent de bois de chauffage, soit 132.000 m³/an. Cette estimation a été effectuée en fonction des classes d'âge, de l'accroissement annuel de chaque classe, de la densité du peuplement et de certaines hypothèses sur le taux de prélèvement et des aménagements

préconisés. Par ailleurs, la production réelle couvrant à la fois la vente du bois par la Régie d'Exploitation Forestière (REF) et le prélèvement par les communautés locales restent difficile à estimer. La REF a vendu un volume de bois de 56.700 m³ en 2016, essentiellement du bois incendié, pour une valeur totale de 1,335 million DT (Tableau 3). Ce volume représente environ un quart du volume total de bois vendu en 2016.

Tableau 3. Quantité, valeur marchande et prix unitaire du bois de pin d'Alep vendu en 2016.

Type	Quantité (m ³)	Proportion	Valeur (DT)	Prix (DT/m ³)
Bois sur pied (90% bois vert+10% incendié)	10886	19,2%	338950	31,1
Bois sur pied (93% bois incendié+7% bois vert)	37197	65,6%	677200	18,2
Bois de trituration	5825	10,3%	262950	45,2
Bois énergie	2684	4,7%	49500	36,9
Autre bois façonné	108	0,2%	6700	61,8
Total	56700		1335300	

Source : Base de données REF 2016

La faiblesse de la production du bois est souvent expliquée par le manque de moyens logistiques et humains pour effectuer l'opération de martelage, des contraintes techniques (absence de plans d'aménagement, absence de conduite sylvicole) en plus des contraintes de développement de l'industrie du bois telles que la mauvaise appréciation du bois par les industriels et la faible compétitivité de l'industrie du bois (Daly-Hassen *et al.*, 2004). Malgré l'importance des nouvelles plantations de pin d'Alep au cours des cinq dernières décennies, le pays est toujours dépendant des importations pour satisfaire les besoins en bois industriel (Daly-Hassen *et al.*, 2014).

Les prix varient selon le type de bois et de son usage. Le bois de trituration, utilisé pour la fabrication de panneaux, est vendu à 45,2 DT/m³, et le bois d'énergie, utilisé pour la fabrication des pellettes et le chauffage, est vendu à 36,9 DT/m³ en moyenne. Le bois de sciage, utilisé pour la fabrication de palettes, vendu en mélange avec d'autres catégories de bois, à un prix de 61,8 DT/m³ (cf. Tableau 3).

En se basant sur un rendement journalier de récolte de bois variant de 1 à 1,25 m³/jour selon la nature de la récolte (en régie ou en entreprise), la récolte du bois a engendré l'emploi de l'équivalent de 600 ouvriers à temps partiel (80 jours de travail par an) en 2016.

3.2. Les graines de pin d'Alep (zgougou)

Les graines de pin d'Alep, appelées couramment “zgougou”, sont très demandées en Tunisie pour la préparation d'une crème pâtissière pendant la fête du Mould. Actuellement, les grands massifs productifs de graines de pin d'Alep sont par ordre d'importance : Siliana, Kasserine, Kef, Zaghouan et Béja (Ayari, 2012). La stratégie forestière s'oriente vers une vision qui prend en compte l'ensemble des activités des chaînes de valeur ajoutée (CVA) afin d'accroître leur contribution à l'économie locale et nationale. La chaîne de valeur “zgougou” dérive essentiellement du consommateur jusqu'aux collecteurs des cônes. Cette dernière fait travailler saisonnièrement, en plus des commerçants et des grossistes, plusieurs familles des zones rurales. Shröder et al. (2014) ont noté que 200 micro-entreprises familiales d'exploitation de zgougou génèrent 12.000 DT de chiffre d'affaire annuel chacune et captent plus que 50% de la valeur ajoutée malgré la dureté du travail. Les populations locales gagnent un revenu qualifié de deuxième position après l'agriculture. De plus, les emplois créés en aval de la CVA (zgougou moulu, pâtisseries, glacières, décoration etc.) génèrent une valeur ajoutée additionnelle pour l'économie nationale.

Dahmane (1986) a estimé la production de graines dans les forêts de pin d'Alep à 30 kg/ha/an, soit 10680 t/an. Par la suite, Sghaier et al. (1997) ont estimé la production du zgougou dans les forêts d'Ouargha, Sakiet Sidi Youssef (Kef) entre 5 et 11 kg/ha. Plus récemment, Ayari (2012) a estimé que l'arbre moyen produit en moyenne 112 cônes avec un contenu en graines de 137,9 g dans les forêts du pin d'Alep en Tunisie, soit une production moyenne de 29,3 kg/ha de graines. En considérant les surfaces exploitables identifiées par la REF

et les densités des peuplements (DGF, 1995), la quantité totale de zgougou produite dans les six principaux gouvernorats serait de 1962 t sur une superficie totale de forêts exploitables de 66929 ha (tableau 4). Cette production de zgougou est très variable selon le gouvernorat.

Tableau 4. Production estimée des graines de zgougou et estimation de la quantité produite dans six différents gouvernorats de la Tunisie pour l'année 2007.

Gouvernorat	Forêts exploitables (ha)	Densité (n/ha)	Production par arbre (g)	Production par hectare (kg)	Production totale (t)
Beja	6255	277	206,16	57,11	357,20
Kairouan	3100	255	88,23	22,50	69,75
Kasserine	12760	294	169,23	49,75	634,86
Kef	23314	264	107,26	28,32	660,17
Siliana	9326	164	97,35	15,97	148,89
Zaghouan	12174	154	48,77	7,51	91,43
Total et/ou moyenne	66929	-	119,5	35,69	1962,30

Sources : REF (2015), DGF (1995), Ayari (2012).

Par ailleurs, la REF (2015) a estimé la production annuelle de graines à 306 t en 2015 sur une superficie exploitable de 72 000 ha, soit 4,25 kg/ha, ce qui peut être considéré comme une sous-estimation de la production. La différence entre les estimations de production par ha peut être expliquée par l'irrégularité en production annuelle qui est fonction des facteurs climatiques et édaphiques, de la densité du peuplement, de l'âge et de la hauteur des arbres, etc. (Ayari, 2012). Cette divergence en productions annuelles peut être expliquée par les extrapolations de chacun de ces cas d'étude sur la couverture de la forêt du pin d'Alep.

Toutefois, la quantité commercialisée ne concerne qu'une partie de la production récoltée. Les exploitants s'orientent souvent vers les peuplements et les arbres les plus productifs dans les sites les plus accessibles. La FAO (2012) in Shröder *et al.* (2014) a estimé la quantité des graines commercialisée annuellement à 500 t/an environ.

L'exploitation commence annuellement vers le 15 novembre et s'achève vers mi-avril. L'exploitation des cônes de pin d'Alep est règlementée par la vente des droits de collecte par la Régie d'Exploitation Forestière aux exploitants. Toutefois, la quantité vendue ne dépasse pas le tiers de la quantité proposée à l'exploitation. Elle est de loin inférieure à la quantité commercialisée (Tableau 5). En prenant le cas de Siliana qui représente le foyer de regroupement principal des produits, une quantité de 176 t des graines zgougou a été commercialisée en 2014 avec une autorisation de vente de ce produit (permis de colportage). Ce chiffre montre qu'environ un tiers seulement des quantités récoltées sont réellement commercialisées dans les circuits officiels.

Tableau 5. Vente de cônes de pin d'Alep sur pied par la REF durant la période 2009-2015.

Campagne	Quantité de cônes		% de vente	Prix moyen sur pied (DT/t)	Valeur (DT)
	proposée (t)	vendue (t)			
2009/10	6420	1460	23	90	132.120
2010/11	6620	2180	33	112	243.824
2011/12	9360	1060	11	65	68.315
2012/13	11800	1300	11	77	100.716
2013/14	5780	820	14	72	59.112
2014/15	6137	1642	27	107	175.002

Source : *Rapports annuels, REF (2015).*

La production des graines de pin d'Alep comprend deux étapes principales, à savoir la récolte des cônes et l'extraction des graines à partir des cônes récoltés. Ce sont les tribus d'Ouled Ayar relevant du gouvernorat de Siliana qui sont particulièrement spécialisées dans l'exploitation de ce type de ressources forestières. La quantité de cônes cueillie est de 50 kg/jour/personne ; en supposant une production annuelle de 500 t de graines, la récolte de cônes fait employer 2500 personnes par saison, soit une durée de 80 jours/an par personne. Les quantités de graines produites varient entre 200 et 500 kg par ménage. Ce sont les femmes et les enfants qui sont les plus impliqués dans la cueillette des cônes et l'extraction des graines.

A Siliana, plus d'une quarantaine de commerçants s'installent pour la collecte, la conservation, le transport et la distribution des graines de pin d'Alep à l'échelle nationale. Les principaux centres de distribution sont localisés à Tunis (70% des graines en vrac y sont amenées et vendues aux grossistes de la rue d'Espagne), à Sfax et Sousse (30% de la production). Les grossistes vendent souvent le zgougou sous forme de graines en vrac parmi d'autres fruits secs où leur marge bénéficiaire varie entre 1,5 et 3,5 DT par kg de zgougou. Par contre, le prix d'achat au consommateur varie entre 11 et 16,5 DT/kg en 2016. La valeur de production est ainsi estimée à 6 millions DT sur la base d'un prix moyen de 12 DT/kg. Les principaux clients sont les grandes surfaces et les détaillants des fruits secs, les pâtisseries, les restaurants et les hôtels spécialisés dans la production des crèmes desserts parfois glacées à goûts de zgougou et/ou de l'Assida.

L'analyse économique de la chaîne de valeur montre que l'activité d'extraction des graines est celle qui génère la plus grande part de la valeur ajoutée, ceci peut être expliqué par les nombreuses opérations liées à cette activité: séchage, extraction des graines par l'utilisation d'un four traditionnel, rassemblement, enlèvement des impuretés etc. Ainsi, la plupart de la valeur ajoutée profite aux familles ayant exercé les activités de collecte et d'extraction (cf. Tableau 6).

Tableau 6. Analyse économique de la chaîne de valeur « Zgougou » pour l'année 2014.

<i>Opération et coûts respectifs en DT/kg</i>	<i>Collecte des cônes</i>	<i>Extraction des graines</i>	<i>Collecte et/ou commerce</i>	<i>Vente en gros à Tunis</i>	<i>Vente en détail</i>
Prix de vente du zgougou	1,4	10	12	13	14
Coût de revient	0,5	2,3	10,5	12,5	13,1
Valeur ajoutée du zgougou	0,9	7,7	1,5	0,5	0,9

Source: Shröder et al. (2014).

3.3. Pâturage

La forêt constitue le parcours principal pour l'ensemble du cheptel des habitants des zones forestières. Le bétail, composé de bovins, d'ovins et de caprins, fréquente les parcours forestiers au moins dix mois par an. A Siliana, plus précisément à Sidi Morched, certains bovins passent toute l'année en forêt et sans gardiennage. Le nombre d'animaux pâturant en forêt est difficile à estimer, à part quelques ordres de grandeur dans certaines zones bien déterminées (cf. Tableau 1), par exemple, le nombre d'animaux par ménage à Sidi Morched et Sidi Hmada (Jbel Serj, Siliana) est de 6 têtes en 2006, composé en moyenne de 3,6 têtes d'ovins, 1,2 têtes de caprins et de 0,8 têtes de bovins (Daly-Hassen et Hamrouni, 2007). Le potentiel fourrager du couvert forestier ne peut pas supporter les besoins du bétail dans ces secteurs. La charge supportée par les parcours forestiers est 5 fois plus importante que la charge d'équilibre estimée à 1 unité petit bétail (upb)/ha/an. De ce fait la pression du bétail sur la végétation forestière est manifeste dans certaines parties du massif forestier, et se traduit par un risque de perte de biodiversité et d'érosion du sol. En effet, la comparaison de la production fourragère des forêts et parcours des quatre gouvernorats concernés (128 millions UF), par rapport aux besoins des animaux (902 millions UF) montre un déficit fourrager élevé (différence entre besoins et production pastorale) (cf. Tableau 7).

Tableau 7. Comparaison entre la production fourragère des forêts et parcours et les besoins en fourrages dans les gouvernorats à dominance de forêts de pin d'Alep.

Gouvernorat	Production fourragère 2006 (10 ⁶ UF)	Nb des ovins 2012 (10 ³)	Nb des caprins 2012 (10 ³)	Nb des bovins 2012 (10 ³)	Besoins 2012 (10 ⁶ UF)	Coefficient de surpâturage 2006*
Le Kef	21	544	34	24	208	90%
Siliana	37	686	129	37	293	87%
Zaghouan	8	381	45	26	165	95%
Kasserine	62	643	114	10	236	74%
Total	128	2254	322	97	902	74%

Sources : DGF, 2010 ; Ministère de l'Agriculture, 2013

*Le coefficient de surpâturage est déterminé selon la formule suivante : $S = 100 \times (1 - (Ce/Cr))$; Ce : Charge animale d'équilibre, Cr : Charge animale réelle.

Néanmoins, ce déficit est à prendre avec précaution car il ne prend pas en compte la production des autres usages des terres et la quantité des aliments du bétail acquise par les éleveurs. En effet, plusieurs éleveurs n'ont pas eu recours au pâturage. En 2001, Ben Mansoura et Garchi ont montré que le coefficient de surpâturage, considéré comme surcharge ou surexploitation, est très élevé (74%). L'amélioration de la production et de la gestion durable des forêts s'avère donc nécessaire.

4. Evaluation économique des biens et services des forêts du pin d'Alep

La Valeur Économique Totale (VET) est le concept économique utilisé dans l'évaluation économique des biens et services des écosystèmes. Cette valeur est répartie en plusieurs catégories: valeur d'usage direct, valeur d'usage indirect, valeur d'option, et valeur d'existence et d'héritage (Merlo et Croitoru, 2005).

Dans une étude récente (Daly-Hassen et al., 2012) sur l'évaluation économique des biens et services des forêts tunisiennes, le bassin versant de Siliana a été choisi comme site représentatif des forêts du centre du pays, notamment par la dominance de la forêt du pin d'Alep. La surface du pin d'Alep dans le bassin versant de Siliana est de 11.300 ha en 2000 sur une superficie totale de 90.969 ha, soit 12,4%. Les autres usages des terres sont principalement les cultures annuelles en sec (50,5%), les autres terrains de culture (15,4%) et les garrigues (11,6%).

4.1. Valeur d'usage direct

La valeur d'usage direct comprend l'ensemble des prestations (produits et services) directement utilisables.

Bois. L'accroissement annuel en bois est estimé à 3125 m³/an (DGF, 2010c). La plupart de ce bois est considéré comme bois de feu : 2375 m³. En 2010, la

quantité du bois vendue sur pied par la Régie d'Exploitation Forestière était de 843,5 m³, le prix moyen était de 28,6 DT/m³, soit une valeur totale de 24.100 DT et une valeur moyenne de 2,1 DT/ha en 2010.

En plus, le bois est consommé comme source d'énergie par la population locale. Le combustible utilisé est constitué en majorité de bois et/ ou de branchages de pin d'Alep, de chêne vert, de romarin et d'autres espèces du sous-bois telles que le lentisque, la globulaire, etc. Le bois est en priorité employé pour la cuisson du pain et le chauffage des habitations. L'approvisionnement en bois de feu est effectué à longueur d'année pour les ménages des douars situés à proximité des forêts et en automne pour les ménages plus lointains. Le mode d'approvisionnement varie selon le caractère plus ou moins urbain de la localité. Dans les villages tels que Mansoura et Kessra, le bois est le plus souvent acheté et transporté par remorque. La carbonisation est pratiquée traditionnellement par la plupart des usagers, et ce, pour satisfaire la consommation familiale. En effet, le charbon est utilisé seulement à des fins domestiques, notamment pour le chauffage et la préparation du thé. Les quantités consommées par ménage varient entre 200 et 350 kg/an. Cette activité constitue une composante du revenu pour certaines familles qui, en plus de la production du charbon pour leurs besoins d'autoconsommation, commercialisent 200 kg en moyenne durant la période hivernale. La valeur du bois a été basée sur le prix de vente par adjudication du bois de maquis, soit un prix moyen de 9,4 DT/m³ en 2010. On suppose que les disponibilités annuelles de bois de feu sont de 1 m³/ha en moyenne provenant des forêts, ainsi, la valeur du bois-énergie a été estimée à 9,4 DT/ha de forêt de pin d'Alep. Au total, la valeur du bois est estimée à **15,2 DT/ ha** au prix de 2016.

Pâturage. En utilisant les données du premier inventaire (DGF, 1995), la production fourragère des forêts de pin d'Alep dans le gouvernorat de Siliana est de 225 UF/ha. En considérant le prix économique de l'orge (0,3 DT/kg) comme valeur de l'unité fourragère, la valeur des ressources fourragères est estimée à 67,5 DT/ha en 2010, soit 89,2 DT/ha au prix de 2016.

Plantes aromatiques et médicinales (PAM). Plusieurs PAM font l'objet d'une distillation traditionnelle comme: le romarin (*Rosmarinus officinalis* L. appelé communément iklil), l'armoise blanche (*Artemesia herba alba* Asso (chih)), l'armoise champêtre (*Artemesia campestris* L. (dgouft)) et le Marrubia (*Marrubium vulgare* L. (maroubia)). Toutefois, l'activité économique provient surtout de la distillation industrielle du romarin. La valeur économique considérée correspond à la vente des droits d'exploitation du romarin par la REF, soit 99.400 DT en 2010, correspondant à une valeur de 4,2 DT/ha, soit 5,6 DT/ha au prix de 2016. En plus du romarin, d'autres espèces sont exploitées avec une production atteignant une moyenne de 200 kg de biomasse par campagne et par ménage ; les plantes sont livrées à une société locale (El Ayachi), pour leur séchage et leur distribution en tant que produits aromatiques. La valeur économique de ces plantes n'est pas considérée à défaut d'information.

Les cônes de pin d'Alep. Selon l'arrondissement des forêts de Siliana, la production moyenne en cônes est estimée à 60 kg/ha en 2010, ce qui peut être considéré comme une sous-estimation. Tenant compte de l'irrégularité de la production et des difficultés de récolte, on considère une production de 160 kg/ha/an, la moitié de la production indiquée dans le tableau 4. Le prix des cônes est de 107 DT la tonne en 2015 (REF 2015). La valeur économique des cônes est ainsi estimée à **18,7 DT/ha** de forêts au prix de 2016.

Le miel. Sur la base des enquêtes socio-économiques effectuées en 2000 auprès des ménages situés à proximité des forêts de pin d'Alep à Harrigue belloume à Kessera (DGF, 2010a) et Rous ellouizet à Bargou (DGF, 2010b), une proportion de 12% des ménages pratiquent l'apiculture. Avec une production moyenne de 15 litres de miel/ménage, le revenu moyen annuel généré est de 300 Dinars/ménage sur la base de 20 DT/kg de miel. En considérant que la valeur du bénéfice de la forêt est équivalente au prix de location dans les terres agricoles pour l'installation des ruches (1 kg de miel par ruche), la valeur serait estimée à **1,6 DT/ha** de forêts en 2016.

La chasse. Les rapports de la brigade nationale de la chasse de la période 2005-2010 (DGF, 2005-2010) permettent de dégager des indicateurs pour déterminer la valeur du gibier pour le gouvernorat de Siliana. Environ 8% des ménages pratiquent la chasse soit 929 chasseurs. La valeur de la chasse se réfère à la valeur du gibier. Le prix moyen est de 3 DT/kg pour le petit gibier (3713 perdreaux et 6503 autres petits gibiers par an) et de 3,5 DT pour le gros gibier (134 sangliers par an) selon les chasseurs. Le poids moyen à l'unité est estimé à 70 kg pour le gros gibier, 0,45 kg pour les perdreaux, 3,5 kg pour les lièvres et 0,1 kg pour les petits gibiers divers. La valeur est ainsi estimée à 49500 DT, soit 2,1 DT/ha en 2010, ou **2,8 DT/ha** de forêts en 2016.

Les valeurs culturelles et du paysage. Les valeurs culturelles sont concrétisées par la visite de la forêt lors des manifestations culturelles, en particulier le festival de Sidi Hmada et les festivités relatives aux «zerda» célébrées dans les autres marabouts. Ces valeurs n'ont pas été évaluées à cause de l'absence des travaux de recherche dans ce domaine. Au total, la valeur d'usage direct est estimée à 95 DT/ha en 2010, soit **133,1 DT/ha** de forêts au prix de 2016.

4.2. Valeur d'usage indirect

La valeur d'usage indirect se réfère aux fonctions écologiques de la forêt.

La protection du bassin versant. Le modèle empirique de prévision des pertes de sol a été utilisé pour estimer l'impact du couvert forestier sur la réduction de la sédimentation du barrage Siliana. L'intérêt immédiat de ce modèle est de simuler l'impact de l'absence de la forêt sur l'envasement du barrage Siliana.

Cette quantification a permis de comparer entre la situation actuelle et un scénario de simulation relatif à une absence des forêts. La situation actuelle avec une couverture forestière présente de faibles taux d'envasement (<12t/ha/an) sur 78% de la superficie du bassin versant. Cependant, le scénario de simulation de

l'absence des forêts montre uniquement 67% de la superficie soumise à une faible érosion hydrique. A l'échelle du bassin versant, la forêt contribue à réduire les pertes en termes de sédimentation de la retenue du barrage Siliana de 338.000 m³, ainsi la réduction de sédiments par ha de forêts est de 12,8 m³/an. La valeur des dommages évités en termes de capacité en eau a été ainsi estimée à travers le coût de remplacement. Cette méthode fait référence aux coûts de construction des barrages (Melah et Serrat). Un coût de 1,9 DT/m³ de capacité de la retenue est considéré en tant que valeur de dommages évités relatives à la protection des sols contre la sédimentation. Il en résulte que la valeur liée à la protection est estimée à 24,4 DT/ha de pin d'Alep en 2010, soit **32,3 DT/ha** au prix de 2016.

La fixation de carbone. La séquestration du carbone a été estimée sur la base des occupations forestières du bassin versant de Siliana (DGF, 2010c). Pour le carbone annuel fixé par les arbres forestiers (biomasse aérienne), les accroissements ligneux annuels ont été convertis en biomasse sur la base des densités spécifiques de leurs bois (0,6 pour le genévrier, 0,7 pour le pin d'Alep et 0,8 pour le chêne vert). La biomasse totale a été estimée en considérant la valeur du facteur d'expansion "racines", soit 1,29 selon Vogt et al. (1996). Les accroissements ligneux annuels en biomasse aérienne des tiges et racines ont été transformés en biomasses carbonées en multipliant cette quantité par un coefficient de 0,5. Pour la biomasse des garrigues arborées, les résultats des estimations des peuplements clairs de pin d'Alep ont été utilisés sans intégrer les ligneux bas. La séquestration du carbone des garrigues est obtenue en divisant la biomasse de carbone (DGF, 1995) par l'âge moyen estimé à 20 ans. Pour la séquestration annuelle du carbone dans le sol sur les horizons superficiels ne dépassant pas 30 cm de profondeur, le ratio de 33% annoncé par Askri (2008) est utilisé. En utilisant les coefficients de conversion indiqués plus haut, le flux annuel carboné à partir des strates arborées est estimé à 7145 tonnes de carbone en 2010 soit 0,58 t/ha/an. Ainsi, la valeur liée à la séquestration du carbone est estimée à 12,5 DT/ha de forêts en se basant sur un prix de carbone

sur le marché international de 15 \$/t (21,5 DT/t CO₂) en 2010 (*Carbon finance*) , soit **16,5 DT/ha** au prix de 2016. Au total, la valeur d'usage indirect est estimée à **36,9 DT/ha**.

4.3. Valeur d'option

La valeur d'option se réfère aux bénéfices d'usage futurs. La forêt constitue un potentiel de ressource qui pourrait être utilisé dans le futur. En effet, des activités d'apiculture et d'utilisation des plantes pour des usages aromatiques et médicinaux peuvent être développées. Toutefois, il convient de noter que l'administration a déployé des efforts importants dans le cadre de projets de développement intégré pour mieux valoriser les produits forestiers non ligneux, et qui n'ont abouti qu'à des résultats très timides (Daly-Hassen et Hamrouni, 2007). Aussi, les paysages forestiers constituent un potentiel écotouristique important dans le futur. Le tourisme écologique, le tourisme culturel, le tourisme de chasse et le sport confèrent au Jbel Serj son originalité de mise en valeur par l'existence de son aire protégée. Sur l'ensemble du massif, les naturalistes, les chercheurs multidisciplinaires et leurs étudiants peuvent pratiquer les prospections scientifiques de tout genre (Daly-Hassen et Hamrouni, 2007). Il n'y a pas eu d'évaluation de la disposition à payer pour les utilisations futures de ces bénéfices en Tunisie. En l'absence de ce type d'informations, cette valeur d'option n'a pas été évaluée.

4.4. Valeur d'existence et d'héritage

La valeur d'existence et d'héritage fait référence à la disposition à payer de la société afin d'assurer la conservation de l'écosystème pour les générations actuelles et futures. Sa valeur est estimée à travers les dépenses annuelles de l'Etat pour la conservation des forêts du pin d'Alep, en d'autres termes les dépenses de supervision et de gardiennage. En effet, l'administration forestière a fait appel à 400 gardiens dans la région de Siliana en 2010 (139 000 ha), ce qui

correspond à 67 gardiens dans les forêts du bassin versant Siliana. En ajoutant les trois chefs de triage pour la supervision, ces dépenses sont estimées à 196900 DT pour le bassin versant Siliana au cours de l'année 2010. Cette valeur correspond à une moyenne de 8,4 DT/ha, soit **11,1 DT/ha** au prix de 2016.

4.5. Coûts de dégradation

Bien que les avantages que peuvent bien procurer les forêts du pin d'Alep aux bénéficiaires de l'homme sont nombreux, divers types de dégradation des ressources sont subis par l'action humaine à travers le surpâturage, la coupe du bois de feu, le défrichement, le recépage et même le dessouchage des espèces du sous-bois, en plus des incendies.

La conséquence de la déforestation est la perte de ces avantages par rapport à des gains limités, à l'exemple de celle observée lors de la période de la colonisation (Boudy, 1948). En effet, une surface de 98.000 ha de forêts a été déclassée entre 1925 et 1930 pour la création des exploitations agricoles. En plus de très vives réactions provoquées de la part des usagers, la production agricole reste limitée. Sur certains points, des exploitations assez prospères ont été créées, alors que dans beaucoup de cas, un échec a été observé sur des larges étendues, avec la disparition de massifs non suivie par une valorisation des terres défrichées (Boudy, 1948). Soulères en 1969 a souligné que ce n'est que depuis deux ou trois décennies que l'action de l'homme est si gravement ressentie par la forêt liée à un essor démographique relativement rapide. Ces délits continuent à avoir lieu jusqu'à maintenant. Ainsi, le nombre de délits observé en 2014 était de 1124 dans la région de Kasserine (surtout pour la coupe d'arbres et le défrichement), 368 au Kef (coupe d'arbres, labour et exploitation illégale notamment) et 293 délits à Siliana (surtout pour la coupe d'arbres et le défrichement). Le coût de dégradation a été estimé à 12,5 DT/ha en 2016 (Croitoru et Daly-Hassen, 2015), réparti comme suit : surpâturage (2 DT/ha), incendies (6 DT/ha) et dégâts causés par la faune sauvage aux terres de culture (4,5 DT/ha).

4.6. Valeur économique totale des biens et services de la forêt

En agrégeant les valeurs précédentes, la valeur économique totale des forêts de pin d'Alep du BV Siliana est estimée à 180,5 DT/ha au prix de 2016. Les bénéfices atteignent une valeur de 193 DT/ ha et les coûts de dégradation sont estimés à 12,5 DT/ha. La valeur des bénéfices est composée des bénéfices d'usage direct (69%), des bénéfices d'usage indirect (25%), et des bénéfices de non usage (6%). Le fourrage constitue le principal bénéfice (46%) de la forêt en termes de valeur économique, suivi par la protection des sols contre la sédimentation (17%) (cf. figure 1). La valeur des biens et services rendus par la forêt bénéficie à la population locale en premier lieu à travers le fourrage et le bois de feu notamment (59%), à la société tunisienne par la protection des sols (17%), à la communauté globale à travers la séquestration du carbone et la conservation de la biodiversité en particulier (15%), et à l'Etat (9%) à travers la vente du bois sur pied et des droits d'exploitation du romarin et des graines du pin d'Alep. On peut ainsi conclure que le mode de gouvernance actuel est favorable à la population locale.

Si l'on extrapole cette valeur économique sur l'ensemble des forêts du pin d'Alep (356.000 ha), la valeur économique de biens et services fournis par ces forêts est estimée à 64,3 millions DT par an-prix 2016.

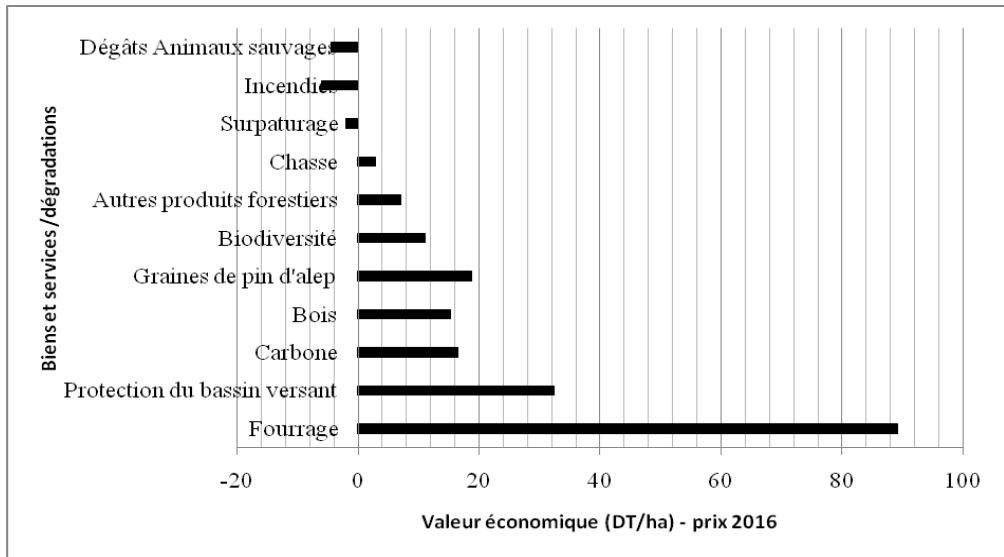


Figure 1. Valeurs économiques des biens et services fournis par les forêts du pin d'Alep du bassin versant Siliana

5. Rentabilité de la plantation de pin d'Alep

Les études existantes sur la rentabilité des plantations du pin d'Alep sont limitées, en plus, elles prennent en compte seulement les valeurs de quelques bénéfiques : le bois et le fourrage dans certains cas. Les publications précédentes ont montré que le taux de rentabilité de la plantation de pin d'Alep est faible (inférieur au coût d'opportunité du capital), ce qui est expliqué par la faible production de bois et la longueur du cycle de production. Le taux de rentabilité interne (TRI) est égal à 5,8% en considérant les productions de bois et de fourrages (Daly-Hassen, 2001) dans les cas où une subvention est attribuée (50% des coûts des travaux de plantation). La rentabilité financière et économique des plantations forestières en général a été aussi analysée (DGF, 2001). En considérant seulement la production du bois, le taux de rentabilité interne a varié entre 1,8 et 2,1% pour l'analyse financière et entre 2,1% et 2,3% pour l'analyse économique selon le type de plantations mécanisées ou manuelles. La production de bois ne peut pas justifier à elle seule les coûts de plantation. Donc, il serait conseillé d'intégrer dans les travaux futurs les bénéfices

fournis en termes de protection des eaux et des sols et de production de graines. Les indicateurs de rentabilité seraient nettement plus élevés en considérant l'ensemble de ces bénéfiques.

Tableau 8. Indicateurs de rentabilité financière de quelques plantations de pin d'Alep.

<i>Région</i>	<i>Kasserine</i>	<i>Zaghouan</i>
Taux de subvention (%)	50%	100%
Année d'installation	1999	1966
VAN (10%, 60 ans) - Prix 1999	-548 DT/ha	634 DT/ha
TRI	5,8%	-

Source : Daly-Hassen. 2001

6. Conclusion

La forêt du pin d'Alep fournit un ensemble d'avantages socio-économiques, contribuant à améliorer significativement le revenu d'une population pauvre vivant à proximité de ces forêts dans les régions intérieures du pays. La production de graines de zgougou contribue à satisfaire les besoins du pays même si la chaîne de valeur des graines de zgougou est mal organisée. Toutefois, les ressources en bois sont sous-exploitées alors que la production de bois ne couvre qu'une très faible part des besoins du pays. La charge animale au niveau des forêts dépasse la capacité de production fourragère, causant leur dégradation progressive. Pour cela, il convient de réfléchir à la mise en place d'une stratégie efficace visant à améliorer le revenu à travers une meilleure exploitation et valorisation des ressources utilisant une approche multi-acteurs. En effet, la gestion forestière en Tunisie a toujours privilégié des objectifs techniques de conservation et de reboisement plutôt que des objectifs de rentabilité économique et de contribution des produits forestiers à l'économie locale et nationale. Il convient donc de réorienter les aménagements vers la production des graines en plus du bois et du fourrage, et d'adopter une approche de coordination d'actions privées et publiques avec la participation des populations locales au niveau des filières visant l'adéquation entre l'offre et la

demande, la sécurité d'approvisionnement des entreprises, la certification et l'attribution d'une appellation d'origine, le soutien des initiatives de marketing, accompagnée d'outils de gestion et d'exploitation durable des ressources. Cette stratégie aura des retombées économiques et sociales importantes dans les zones les plus pauvres du pays par la création d'emploi saisonnier, en plus de sa contribution au financement du secteur forestier.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Messieurs Mohamed Mokhtar et Habib Kachouri (Régie d'Exploitation Forestière), Mr Chedli Karra (DGF) pour la fourniture des données et leur appui, ainsi que Mr Youssef Saadani pour la première révision de ce chapitre.

Références bibliographiques

- Askri Z. 2008. *Contribution à l'évaluation de la séquestration du carbone par la subéraie et ses formations de dégradation et de substitution Kroumirie du NO de la Tunisie*. Mémoire de 3^{ème} cycle, ENFI Salé.
- Ayari A. 2012. *Effet des facteurs environnementaux sur la fructification du pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en Tunisie*. Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences de Tunis, 133p.
- Ben Mansoura A., Garchi S. 2001. *Intégration de l'élevage en fonction du type du couvert ou d'utilisation des terres et de l'aridité en Tunisie*, projet PNM 1996, INRGREF.
- Boudy P, 1948. *Economie forestière Nord-Africaine. Tome I : Milieu physique et milieu humain*. Editions Larose, Paris, 686 p.
- Croitoru L., Daly-Hassen H., 2015. *Analyse des bénéfices et des coûts de la dégradation des forêts et parcours*, DGF/ Banque Mondiale , Tunis.
- Dahmane M. 1986. Les produits du pin d'Alep en Tunisie. *Options Méditerranéennes*, 157-161.
- Daly-Hassen H. 1998. Les perspectives de l'offre et de la demande de bois rond industriel en Tunisie à l'horizon 2015, *Annales de l'INRAT*, 71 : 275-296.
- Daly-Hassen H. 2001. Evaluation financière du boisement privé: Analyse de quelques cas concrets. *Annales de l'INRGREF*. Numéro Spécial, (2001): 167-179.
- Daly-Hassen H. et Hamrouni A. 2007. *Identification d'outils de gestion participative des ressources forestières*. Projet d'appui à une gestion durable des sols (GDS) à Siliana FEM/FIDA, CRDA Siliana
- Daly-Hassen H., Khouaja A., Chebil A. 2004. Impact de la baisse des tarifs douaniers sur l'industrie de bois local en Tunisie, 3/2004, *NEW MEDIT*, 3 (3) : 28-31.
- Daly-Hassen H., Croitoru L., Tounsi K., Aloui A. et Jebari S., 2012. *Evaluation économique des biens et services des forêts tunisiennes*. DGF/FAO, Tunis.

- Daly-Hassen H., Kasraoui M., Karra C. 2014. Le bois industriel en Tunisie : aggravation de la dépendance extérieure malgré les reboisements. *Bois et Forêts des Tropiques*. N°322 (4), pp.29-37.
- DGF. 1995. *Résultats du premier inventaire forestier en Tunisie*. MARH, Tunis.
- DGF, 2001. *Stratégie nationale de développement forestier et pastoral*. DGF, Tunis
- DGF, 2005-2010. *Rapports annuels*, DGF, Tunis
- DGF, 2010 a- *Aménagement des forêts de Harrigue Belloume à Kessra* DGF, Tunis
- DGF, 2010 b- *Aménagement des forêts de Rous louizet à Bargou*, DGF, Tunis
- DGF. 2010c. *Résultats du deuxième inventaire forestier et pastoral*. Ministère de la Défense Nationale, Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche, et Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, Tunis.
- FAO, 2014. *Situation des forêts du monde. Mieux tirer parti des avantages socioéconomiques des forêts*, FAO, Rome. <http://www.fao.org/3/a-i3710f.pdf>.
- Merlo M. et Croitoru L. (Eds), 2005. *Valuing Mediterranean Forests: Towards Total Economic Value*. CABI Publication, Cambridge, Mass, USA, 406 p.
- Ministère de l'Agriculture, 2013. *Annuaire statistique de la production agricole*, Ministère de l'Agriculture, Tunis
- Régie de l'Exploitation Forestière. 2015. *Rapport Annuel*, Tunis.
- Sghaier T., Khaldi A., Khouja M.L. ; Nsibi R. 1997. Estimation du rendement en cônes et en graines de pin d'alep de la forêt de Ourcha (Tunisie), *Annales de Recherches Forestières*, T(30) :84-89.
- Shröder K., Labidi A., Mezni F. 2014. *Analyse des chaînes de valeur des produits forestiers non ligneux en Tunisie: « Zgougou, lentisque et myrte »*. Rapport du projet Adaptation au changement climatique des politiques forestières dans la région MENA. GFA Consulting Group, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 56p.
- Soulères G., 1969. Le pin d'alep en Tunisie. *Annales de l'INRF*, Volume 2, fascicule 1, Tunis, 126 p.
- Tounsi K. et Ben Mimoun A., 2012. *Etude sur la caractérisation de la population forestière en Tunisie*, DGF/FAO, 2012.
- Vogt K.A., Vogt D.J., Palmiotto P.A., Boon P., O'hara J., Asbjornsen H., 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil*, 187, 1996, pp. 159-219.

CHAPITRE 16

Valorisation agro-alimentaire et qualités nutritionnelles des graines du pin d'Alep

**Mariem Khouja¹⁻², Farah Eleuch³, Chaima Amiri³, Mouna Boulaares³,
Yasmine Gtari², Sami Fattouch², Faten Mezni¹, Abdelbasset Bouzaiène⁴ et
Mohamed Larbi Khouja¹**

1 : Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), B.P. 10, 2080 Ariana

2 : Institut des Sciences Appliquées et de Technologie (INSAT)

*3 : Ecole Supérieure des Industries Alimentaires de Tunis (ESIAT)
Université de Carthage, Tunisie*

4 : Service des Graines-Direction Générale des Forêts, Tunis

Email: khouja.mar@gmail.COM

Résumé. En Tunisie, les graines de pin d'Alep comptent parmi les principaux produits forestiers non ligneux (PFNL) ayant une grande valeur commerciale.

L'intérêt des graines sur les plans nutritionnel, médicinal et cosmétique réside surtout dans leur richesse en acides gras insaturés et en composés antioxydants présents en proportion appréciable dans leur huile végétale extraite naturellement à partir des graines.

Les graines de pin d'Alep peuvent être exploitées doublement pour leur pâte (usage nutritionnel) et pour leur huile végétale (usages médicinal et cosmétique). Cependant, la plus value escomptée en exploitant d'une manière optimale les résidus (pâte dégraissée) après extraction de l'huile peut se révéler très rentable et offrir des gains considérables aux industriels du domaine agro-alimentaire. La valeur et la qualité des produits ainsi obtenus (huile et pâte dégraissée) dépendent étroitement de la qualité de la graine au départ, des conditions de son stockage, du procédé d'extraction de l'huile et celui de transformation de la pâte résiduelle.

Le présent chapitre est une compilation des principaux travaux réalisés en Tunisie sur les graines et l'huile végétale du pin d'Alep. Les résultats rapportés dans ce chapitre montrent le rendement élevé des graines en huile végétale et leur richesse en composés bioactifs bénéfiques pour la santé humaine.

Différents procédés telle que la torréfaction ou l'irradiation permettent d'améliorer la durée de conservation et la qualité organoleptique des graines. L'amélioration des conditions du stockage des graines présente un grand avantage puisqu'elle permet d'assurer un meilleur approvisionnement en périodes creuses à partir de nouveaux produits (sous forme de pâte ou de poudre) dont la consommation est de plus en plus demandée sur la longueur de l'année.

L'extraction de l'huile apporte une valeur ajoutée par rapport à la graine brute. La transformation du résidu des graines après extraction de l'huile dans le sens de sa valorisation est tout à fait possible et peut donner des produits au goût typique agréable.

La préparation d'un cake à base d'une pâte dégraissée est un bel exemple de valorisation de ce résidu et le produit ainsi obtenu est fortement apprécié et peut être largement commercialisé.

Mots clés : pin d'Alep, *Pinus halepensis*, graines, huile végétale, acides gras, agro-alimentaire.

Abstract. Agri-food valorization and nutritional qualities of the seeds of the Aleppo pine. In Tunisia, the seeds of Aleppo pine are one of the most important products of non-timber forest products (NTFPs) with high commercial value.

The nutritional, medicinal and cosmetic benefits of the seeds are due to the high content of unsaturated fatty acids and natural antioxidant compounds present in appreciable proportions in their vegetable oil extracted from the seeds and their dough.

Aleppo pine seeds can be used for their dough (nutritional use) and for their vegetable oil (medicinal and cosmetic uses). However, the use of the residues after extraction of the oil can be very profitable and offer considerable earnings to the food industrialists. The value and the quality of the products obtained (oil and defatted dough) depended with the quality of the seeds, the conditions of storage, the process of extraction of the oil and also of transformation of the residual dough.

This chapter contains the main work done in Tunisia about seeds and vegetable oil of Aleppo pine. The results showed the high yield of seeds in vegetable oil and their richness in bioactive compounds beneficial for human health.

Various methods such as roasting or irradiation can improve the preservation and the organoleptic quality of the seeds. The improvement of seed storage conditions is a great advantage during the no-production period from new products (in the form of dough or powder).

The extraction of the oil provides an added value compared to the raw seed. The transformation of the seed residue after extraction of the oil is possible and can give products with typical taste. The preparation of cake with defatted dough is a good example of recovery of this residue and the product obtained is highly appreciated and can be widely marketed.

Keywords: Aleppo pine, *Pinus halepensis*, seeds, vegetable oil, fatty acids, agro-food.

1. Introduction

Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) est l'une des essences méditerranéennes les plus communes et une richesse forestière pour de nombreux pays du pourtour méditerranéen. En Tunisie, il s'affirme comme la première espèce forestière de par sa couverture spatiale et son intérêt socio-économique. Les graines de pin d'Alep, comptent parmi les principaux produits forestiers non ligneux (PFNL) ayant une grande valeur commerciale.

Les graines de pin d'Alep (ou Zgougou) sont très prisées par les Tunisiens qui l'utilisent traditionnellement pour préparer une crème pâtissière typique à l'occasion du Mould. A part cet usage exceptionnel et propre aux tunisiens, on découvre que les graines du pin d'Alep revêtent une grande importance dans la nutrition humaine (Nergiz & Domnez, 2004) et deviennent de plus en plus populaires puisqu'elles rentrent davantage dans de nombreuses autres préparations culinaires (glace, cakes, pâtisserie traditionnelle,...). Par ailleurs, selon la littérature, les graines de nombreuses espèces de pin, trouvent une utilisation très variée en médecine traditionnelle notamment comme remède naturel contre la fatigue et le vieillissement (Watanabe et *al.*, 1995), en tant qu'anti-inflammatoire (Rohdewald, 2002 ; Yen et *al.*, 2008), antinéoplasique (Li et *al.*, 2007 ; Potta et *al.*, 2005), antibactérien (Maksimiuk, 1970), immunomodulateur (Li et *al.*, 2007; Rohdewald, 2002) et anticancéreux (Kadri et *al.*, 2014 ; Khouja, 2016). L'intérêt médicinal du pin le doit surtout à la richesse de ses graines en composés bénéfiques pour la santé, et plus particulièrement, aux antioxydants naturels qu'elles renferment (Su et *al.*, 2009). Par ailleurs, l'acide α -linoléique qui est doté d'un effet très avantageux sur la santé humaine, notamment contre les maladies cardiovasculaires et certains cancers, est présent en proportion appréciable dans l'huile végétale des graines du pin d'Alep (Cheikh-Rouhou et *al.*, 2006 ; Khouja, 2016).

De par ses caractéristiques physico-chimiques remarquables et sa richesse en composés actifs, l'huile végétale est très demandée dans les secteurs des industries médicinales, pharmaceutiques et cosmétiques. Une telle huile a une odeur végétale délicate caractéristique du pin d'Alep, une coloration jaune claire et une texture légère. Elle se distingue aussi par un arôme agréable et doux, possède un excellent toucher et pénètre facilement dans la peau.

La teneur et la composition chimique de cette huile diffèrent selon la provenance de la graine et selon le mode d'obtention (Khouja, 2016). Cependant, c'est une huile considérée comme étant fortement insaturée avec une prédominance nette des acides gras insaturés (AGI) (90,98 %) par rapport aux acides gras saturés (AGS) (8,01 %) et avec la dominance des acides gras

polyinsaturés (AGPI) (77,38%) contre (13,60 %) pour les acides gras monoinsaturés (AGMI). Elle est composée majoritairement par quatre acides gras à savoir : l'acide oléique (12,34%), l'acide linoléique (62,52 %), l'acide palmitique (4,36 %) et l'acide stéarique (3,33 %).

Comme les intérêts des graines de pin d'Alep sont nombreux, la plus value escomptée en les transformant en huile et en exploitant d'une manière optimale les résidus après extraction de l'huile peut se révéler très rentable et drainer des profits considérables aux industriels du domaine agro-alimentaire. Cependant, la valeur du produit (huile et pâte dégraissée) dépend étroitement de la qualité de la graine elle-même, des conditions de son stockage, du procédé d'extraction de l'huile et celui de transformation de la pâte résiduelle.

Le présent chapitre est une compilation des principaux travaux réalisés en Tunisie sur les graines et l'huile végétale du pin d'Alep qui traitent particulièrement de la caractérisation physico-chimique des graines et de la pâte dégraissée et des possibilités de leur valorisation respective dans le domaine de l'industrie agro-alimentaire.

2. Caractérisation des graines du pin d'Alep

La caractérisation physico-chimique des graines de pin d'Alep est approchée par une analyse de leur teneur en cendres, en protéines et en eau. La détermination de la teneur en cendres et en protéines renseigne sur la richesse respective en minéraux et en acides aminés, considérée potentiellement comme un critère important dans le domaine de l'industrie agro-alimentaire. Les teneurs des graines du pin d'Alep en cendres et en protéines sont respectivement de 8,2% et 22,5%. Quant à la teneur en eau, elle varie de 7 à 8% selon la provenance des graines, des valeurs qui sont supérieures à celle trouvée par Nergiz et Denmez (2004) (5,15%). La variation du taux d'humidité est fonction de plusieurs facteurs dont les conditions climatiques du site de récolte, la technique de séchage et les conditions de stockage des graines. Le taux d'humidité revêt une importance particulière pour les denrées alimentaires. En

effet dans le cas particulier des graines du pin d'Alep, un taux d'humidité relativement élevé risque de provoquer une altération de la qualité des graines lors du stockage, voire une toxicité très grave pour les consommateurs (mycotoxine).

3. Caractérisation de l'huile végétale des graines du pin d'Alep

Généralement, les pins sont des espèces oléagineuses. Plus particulièrement, les graines du pin d'Alep sont dotées d'une richesse relativement importante en huile végétale (ou huile fixe). Le rendement des graines du pin d'Alep tunisien en huile végétale extraite mécaniquement par une presse à froid est de l'ordre de 12%-15%. Ce taux augmente d'une manière significative quand on procède par une extraction par Soxhlet à l'aide d'un solvant (hexane) et peut atteindre les 23% en moyenne (17,4 à 29,5% selon la provenance). Cette importante différence peut être expliquée par le fait que le procédé d'extraction par Soxhlet par l'intermédiaire d'un solvant organique, permet une meilleure solvabilité de la matière grasse qu'on peut récupérer presque en totalité après l'évaporation du solvant. Ces résultats sont en concordance avec les résultats de Chaaben *et al.*, (2015) qui ont trouvé un rendement d'extraction de l'ordre de 21,6% en utilisant la méthode de Soxhlet. Cependant, quel que soit la méthode d'extraction, le rendement en huile des graines de pin d'Alep est très variable et dépend étroitement de l'origine géographique des graines.

En ce qui concerne la qualité de l'huile du pin d'Alep, elle est définie par l'ensemble de ses caractéristiques chimiques, physiques et sensorielles. De telles caractéristiques sont approchées par la mesure et l'évaluation d'un certain nombre de paramètres et indicateurs se rapportant principalement : au degré d'acidité (exprimé en % d'acide oléique), à l'indice d'acide, à l'indice de peroxyde, aux valeurs d'extinctions spécifiques des absorbances dans l'UV à 232 nm et 270 nm et à la note organoleptique. L'évaluation de ces paramètres sur des huiles obtenues expérimentalement par deux procédés d'extraction (presse et

soxhlet) a permis de vérifier leur variabilité en fonction de l'origine géographique des graines. Concernant l'indice d'acide, les valeurs obtenues pour les huiles pressées à froid chez trois provenances tunisiennes (Beja, Foussana et Kasserine) sont respectivement de l'ordre de 0,85 mg KOH/g, 1,28 mg KOH/g et 1,51 mg KOH/g. Ces valeurs sont conformes à la norme du programme mixte FAO/OMS ALINORNI 95/17 qui exige un indice ne dépassant pas 4 mg de KOH/g. En procédant par une extraction au Soxhlet, l'indice d'acide de l'huile atteint 5,6 mg KOH/g chez la provenance de Foussana et dépasse ainsi le seuil exigé par la norme. Les autres provenances maintiennent des indices d'acide beaucoup plus faibles, de l'ordre de 1,12 mg KOH/g (Béja) et 0,78 mg KOH/g (Kasserine). Le dépassement obtenu dans le cas de l'huile de la provenance Foussana peut être expliqué par un phénomène d'altération suite à une oxydation ou une mauvaise conservation de l'huile.

L'acidité des huiles extraites par presse à froid des graines du pin d'Alep varie significativement avec la provenance de 0,65 % à 1,43%, des taux qui sont supérieurs à celui trouvé par Cheikh-Houhou et *al.*, (2006) qui obtiennent une valeur de 0,61%. Ces valeurs peuvent exprimer l'état initial des graines dont la soumission à une haute température lors du décorticage des graines et de la séparation des coques, peut engendrer une oxydation rapide. Comparativement aux huiles extraites par Soxhlet, le taux d'acidité baisse à 0,56% voire 0,39% respectivement pour les deux provenances de Kasserine et Béja.

En ce qui concerne l'indice de peroxyde, exprimé généralement en milliéquivalent d'oxygène actif par kg d'huile, il ne doit pas dépasser 10 méq O₂/kg pour toutes les huiles végétales d'après la norme ALINORNI 95/17. Nous notons que les indices de peroxyde des huiles obtenues par la méthode de presse sont de l'ordre de 2,7 ; 7,5 et 8,5 méq d'O₂/ kg contre 5,1 ; 15,5 et 20 méq d'O₂ actif/kg pour l'huile extraite par Soxhlet respectivement pour Béja, Foussana et Kasserine.

En comparant, les deux méthodes d'extraction de l'huile, nous pouvons conclure que l'huile du pin d'Alep obtenue par presse (méthode traditionnelle) est plus stable et moins oxydée. Des résultats similaires ont été enregistrés par

Cheikh-Houhou et al, (2006) qui trouvent un indice de peroxyde de l'ordre de 3,18 méq d'O₂/kg d'huile.

Par ailleurs, la présence des composés d'oxydation dans une huile peut être mise en évidence par la mesure de l'extinction spécifique à certaines longueurs d'onde (232 nm et 270 nm). Le coefficient d'extinction spécifique K₂₃₂ des échantillons analysés est respectivement de l'ordre de 0,194 ; 0,096 et 0,142 respectivement pour les 3 provenances Kasserine, Foussana et Béja. Ces résultats montrent que les huiles sont faiblement peroxydées, avec une certaine nuance concernant l'huile extraite par Soxhlet qui contient plus de corps gras peroxydés.

De même, les coefficients d'extinction spécifique K₂₇₀ trouvés sont de l'ordre de 0,197, 0,131, et 0,168 respectivement pour Kasserine, Foussana et Béja. Ces faibles valeurs indiquent que l'oxydation secondaire est limitée suite à la présence des antioxydants naturels dans l'huile.

Pour l'indice de réfraction, qui informe sur le nombre des doubles liaisons et donc sur le groupe de l'huile étudiée, nous notons qu'il n'y a pas de grande variation en fonction de la méthode d'extraction. En effet, la méthode d'extraction par Soxhlet donne des valeurs de l'ordre de 1,412 ; 1,479 ; 1,442 contre 1,401 ; 1,494 ; 1,462 par la méthode d'extraction par presse, respectivement pour Kasserine, Foussana et Béja. Ces valeurs sont proches de celle trouvée par Cheikh-Houhou et al., (2006) et qui est de l'ordre de 1,475.

Composition chimique de l'huile du pin d'Alep

La composition chimique de l'huile de pin d'Alep obtenue par Soxhlet a été analysée par chromatographie en phase gazeuse à détecteur et à ioniseur de flamme CPG. Les composés identifiés et leur pourcentage relatif comparés avec les résultats trouvés dans la bibliographie (Nasri et al., 2008 ; Cheikh-Houhou et al., 2026 ; Kadri et al., 2015) sont représentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Composition chimique de l'huile végétale du pin d'Alep.

Acide gras (en %)	Nsari et al (2008)	Cheikh-Houhou et al (2006)	Kadri et al (2015)	Chaaben et al (2015)	Nos résultats
Palmitique (C16:0)	5,11	8,75	4,99	5,67	4,4 (3,0 - 5,8)
Stéarique (C18:0)	3,33	4,32	3,26	3,56	3,3 (2,1 - 4,4)
Oléique (C18:1)	24	27,3	24,55	26,36	12,3 (8,0 - 15,4)
Linoléique (C18 : 2)	56,44	48,8	59,25	62,19	62,5 (61,2 - 63,7)
Linoléique (C18 :3)	3,31	4,86	4,03	0,89	14,9 (12,2 - 17,3)
Arachidique (C20 :0)	0,55	0,62	3,89	0,24	0,23 (0,02 - 0,63)

En se basant sur nos résultats, on remarque, pour toute provenance confondue, que l'huile végétale de pin d'Alep est riche en acide linoléique (62,5%) suivi par l'acide linoléique (14,9%) et l'acide oléique (12,3%). L'huile comprend aussi d'autres fractions, mais en proportions faibles à très faibles. C'est le cas notamment de l'acide stéarique, palmitique, et l'acide arachidique. On remarque que parmi les provenances étudiées, c'est la provenance Béja qui s'est distinguée par la teneur la plus élevée en acide linoléique et linoléique avec des teneurs de l'ordre de 63,7% et 17,3% respectivement (ce qui montre la richesse de cette huile en acides gras insaturés).

Comparée à celles trouvées par d'autres auteurs ayant travaillé sur du pin d'Alep tunisien, on remarque que notre huile s'est distinguée par la teneur la plus élevée en acide linoléique et à l'opposé par une moindre richesse en acide oléique.

Les composés majoritaires de l'huile végétale de pin d'Alep présentent plusieurs activités biologiques intéressantes. Cependant, il faut signaler que les activités biologiques d'une huile végétale ne sont pas seulement dues aux composés majoritaires mais aussi à l'effet synergique que peut apporter certains autres composés contenus dans l'huile. Généralement, la composition chimique des huiles végétales dépend de plusieurs facteurs tels que l'espèce et, pour une même espèce, l'origine géographique des graines qui peut inclure les deux principales composantes génétique et environnementale.

Effet de la torréfaction sur la composition et la qualité des graines du pin d'Alep

La torréfaction est l'un des procédés utilisés pour traiter les noix et les graines en vue d'obtenir une poudre ayant une durée de conservation plus longue. En faisant varier à la fois la chaleur et le temps d'exposition des graines par le procédé de torréfaction, il peut y avoir des modifications de la composition chimique des graines. D'où l'intérêt de chercher le couple «temps-température » qui n'affecte pas leur qualité intrinsèque et plus particulièrement leurs qualités nutritive et organoleptique.

Les graines de pin d'Alep ont été torréfiées selon un protocole expérimental basé sur l'application d'une combinaison de 3 températures : 60°C, 120°C et 180 °C et de 3 durées d'exposition : 10, 30 et 50 minutes.

Avant torréfaction, les graines de pin d'Alep sont caractérisées par un pH de 6,3, une teneur en cendres de 7,1 %, une teneur en eau de 8,2 % et une teneur en protéines de l'ordre de 21,5 %.

Après torréfaction, on a constaté que les graines ont changé de couleur et subi un brunissement. Cependant, le degré de ce brunissement a varié proportionnellement en fonction de l'intensité et de la durée de la torréfaction (couple température-temps) du brun bistre au brun caramel. Ce changement de couleur est essentiellement dû à une réaction non enzymatique de type : réaction de Maillard et interaction lipides-protéines (Buckholz et *al.*, 1980 ; Del Castillo, 2002 ; Durmaz et Alpaslan , 2007).

Il est connu aussi que la torréfaction influe sur les qualités nutritionnelles et organoleptiques du produit fini. Pour cette raison, il est important d'évaluer la composition chimique des graines telle que la teneur en sucres et en protéines, la teneur en flavonoïdes et anthocyanes ainsi que l'activité antioxydante pour déterminer si ce traitement thermique affecte ou non les propriétés biologiques de la matière.

- **Effet de la torréfaction sur les composés phénoliques totaux**

Pour une durée de torréfaction de 10 minutes, la teneur en composés phénoliques est de l'ordre de 0,019 mg/ml pour les températures 60 et 120°C, alors qu'elle est de l'ordre de 0,071 mg/ml pour la température 180°C. Aussi, on a remarqué qu'en augmentant le temps d'exposition à 30 minutes, ces teneurs atteignent des pics de l'ordre de 0,119 mg/l à 60°C, 0,061 mg/l à 120°C et 0,2 mg/l à 180°C, puis à 50 minutes, elles décroissent pour atteindre 0,035 mg/l à 60°C, 0,05 mg/l à 120°C et 0,094 mg/l à 180°C. Ces variations prouvent la grande sensibilité des polyphénols en fonction des deux paramètres pris conjointement : temps et température. En effet, les composés phénoliques sont des composés thermolabiles, ils sont, de ce fait, facilement décomposés sous l'effet d'une température élevée (> à 80°C) (Hecimovic *et al.* 2011). Cependant, l'augmentation des teneurs en composés phénoliques peut être expliquée par leurs interactions avec d'autres molécules complexes. L'étude de Jakobek (2015) a confirmé et justifié cette hypothèse : les lipides, les protéines et les hydrates de carbone peuvent interagir et entrer en contact avec les composés phénoliques existants. De plus, la torréfaction convertit d'une part les composés phénoliques insolubles à des formes solubles (Ross *et al.*, 2011) et d'autre part elle peut donner naissance à des composés phénoliques qui sont formés au cours de la réaction de Maillard tels que les mélanoidines et les flavan-3-ols (Machiels et Istasse, 2002).

- **Effet de la torréfaction sur l'activité antioxydante**

Le test antiradicalaire sur DPPH montre que le pourcentage d'inhibition à 60°C est de l'ordre de 42%, 13% et 31% respectivement pour 10, 30 et 50 minutes de torréfaction. Pour les deux autres températures 120°C et 180°C, le pourcentage d'inhibition atteint respectivement 38,3% et 67,1% pour une durée de 30 min et diminue à 14 % et 31% pour une durée de 50 min. On peut déduire que la torréfaction augmente d'une manière significative l'activité antioxydante pour une certaine combinaison temps et température (120°C/30 min), puis elle la

diminue par la dégradation oxydative des composés antioxydants (polyphénols, α -tocophérol...) pour le couple temps/température 120°C/50 min.

- **Effet de la torréfaction sur la teneur en protéines**

Une baisse de la teneur en protéines est observée quelle que soit la température de torréfaction considérée. Pour la température 120°C, la teneur en protéines diminue de 332 $\mu\text{g/ml}$ à 259 $\mu\text{g/ml}$ puis à 240 $\mu\text{g/ml}$ respectivement pour les durées de 10 min, 30 min et 50 min. Concernant la température 60°C, les teneurs en protéines varient de 384 $\mu\text{g/ml}$ à 323 $\mu\text{g/ml}$ et 280 $\mu\text{g/ml}$ pour les mêmes durées. Finalement, pour la température 180°C, la teneur en protéines décroît de 276 $\mu\text{g/ml}$ à 251 $\mu\text{g/ml}$ jusqu'à atteindre 177 $\mu\text{g/ml}$. Ceci peut être expliqué soit par la participation d'une partie de protéines avec les sucres présents dans la réaction de Maillard soit par le phénomène de la dénaturation des protéines sous le choc thermique.

- **Effet de la torréfaction sur la teneur en flavonoïdes**

A 60°C, les teneurs en flavonoïdes sont de l'ordre de 42 $\mu\text{g eq rutine/ml}$, 45 $\mu\text{g eq rutine/ml}$ et 39 $\mu\text{g eq rutine/ml}$ pour les durées de 10 min, 30 min et 50 min respectivement. Ces valeurs sont les plus faibles par rapport aux autres températures. En effet, à 120 °C, les teneurs en flavonoïdes ont atteint 105 $\mu\text{g eq rutine/ml}$, 146 $\mu\text{g eq rutine/ml}$ et 124 $\mu\text{g eq rutine/ml}$ et à la température la plus élevée (180°C), elles ont augmenté jusqu'à 160 $\mu\text{g eq rutine/ml}$, 173 $\mu\text{g eq rutine/ml}$ et 159 $\mu\text{g eq rutine/ml}$ pour les mêmes durées respectives.

- **Effet de la torréfaction sur la teneur en anthocyanes**

Pour une température de torréfaction de 180 °C, les teneurs en anthocyanes sont supérieures à celles trouvées pour les deux autres

températures (120°C et 60 °C). En effet, la teneur maximale est de l'ordre de 0,196 mg/ml pour une durée de 10 min.

- **Analyse sensorielle des graines torréfiées**

Une analyse sensorielle a été faite chez 60 dégustateurs volontaires de sexe et d'âge différents avec une dominance féminine (72%) et des tranches d'âge bien réparties entre 20 et 60 ans. Le résultat de cette analyse révèle que l'échantillon des graines torréfiées le plus apprécié par une majorité des dégustateurs (38 %) qui a été jugé de meilleur goût et le moins astringent est celui qui a subi une torréfaction à 60°C pendant 50 min. Il a été aussi remarqué que les descripteurs qualitatifs : astringence et amertume sont liés. En effet, les échantillons torréfiés à une forte température (180°C) possèdent une amertume et une astringence prononcées. Cela peut être expliqué par une plus forte teneur en polyphénols pour les graines hautement torréfiées, ceci est en accord avec les résultats de Nazaruddin *et al.* (2006) qui ont prouvé que les polyphénols sont responsables de l'astringence et l'amertume.

D'après ce test, on constate qu'il n'est pas conseillé de torréfier les graines de pin d'Alep à une haute température car il induit une modification importante au niveau des qualités organoleptiques et risque par conséquent d'engendrer un refus du produit par les consommateurs. Cependant, il est important d'optimiser le couple température-durée de torréfaction pour assurer l'obtention à la fois d'une meilleure qualité biochimique et organoleptique possible.

Effet de la conservation au froid sur les composés phénoliques des graines de pin d'Alep

En cherchant les meilleures conditions de stockage, des lots de graines ont été soumis expérimentalement à différentes températures (-20°C, 4° C et température ambiante) pendant 6 semaines dans le but d'étudier la variation des teneurs en composés phénoliques en fonction de la température et du temps. On

a remarqué que la teneur en composés phénoliques totaux décroît au cours du temps pour les trois conditions de stockage, qui est passé de 2100 à 1600, 1700 et 781 mg EAG/100g MF respectivement à 4°C, -20°C et la température ambiante. À 4°C, les teneurs en polyphénols totaux diminuent progressivement jusqu'à la quatrième semaine où elles sont de l'ordre de 1490 mg EAG/100g MF. Ces résultats sont en conformité avec les recherches d'Ibrahim et *al.*, (2011) sur le jus de pomme qui ont trouvé que la teneur en polyphénols décroît au cours de deux semaines et celles de Marquez et *al.*, (2014) sur le vin rouge qui ont révélé une diminution de la teneur en polyphénols totaux au cours de 3 mois de stockage.

À la cinquième semaine, la teneur en composés phénoliques à une température de 4°C augmente de nouveau pour atteindre 2000 mg EAG/100gMF, mais reste inférieure à la teneur initiale des composés phénoliques à t=0 (2100 mgEAG/100gMF).

En se référant à l'étude de Jakobek (2015) portant sur la possibilité d'interactions des polyphénols avec les glucides, les lipides et les protéines. Concernant la température de -20 °C, la baisse des teneurs des composés phénoliques est minime par rapport aux autres températures. On remarque aussi que les teneurs en polyphénols totaux sont beaucoup plus importantes à 4°C que celles mesurées à la température ambiante.

Effet de l'ionisation sur la conservation et la décontamination des graines

L'ionisation est un procédé qui consiste à exposer un produit quelconque pendant un temps donné à un rayonnement ionisant. L'ionisation s'est montrée efficace dans plusieurs applications dans le domaine agroalimentaire dont la conservation des produits alimentaires. En effet cette méthode a été largement testée et étudiée depuis les années cinquante (Vasseur, 1991), l'application de ce procédé utilisant des doses bien étudiées devrait préserver les qualités organoleptiques et nutritionnelles, réduire les charges microbiennes et

augmenter la durée de conservation chez un grand nombre de denrées alimentaires.

Dans le cas des graines de pin d'Alep, Chokri (2005) a testé 4 doses de rayonnement gamma (Cobalt 60) allant de 0,5 à 2,5 kGy en comparaison à un témoin (absence de rayonnement) sur un certain nombre de paramètres à savoir : la composition physicochimique des graines, la durée de conservation, la réduction du nombre initial de germes de contamination et le développement des mycotoxines des graines de pin d'Alep.

Il en ressort que l'irradiation comme traitement de décontamination s'est montrée d'une grande efficacité de point de vue lutte microbologique. En effet, la dose de 1 kGy permet la destruction totale des germes de contamination fécale, des levures et des moisissures. Du point de vue caractéristiques physico-chimiques, l'augmentation de la dose d'irradiation engendre une modification des propriétés physicochimiques des graines du pin d'Alep (diminution de la teneur en eau, augmentation légère de l'acidité, l'indice d'acide et l'indice de peroxyde de l'huile des graines irradiées).

En présence des mycotoxines, l'irradiation a donné de bons résultats. En effet, une faible irradiation à 2 kGy permet de détruire jusqu'à 90 % d'ochratoxine A (OTA) présents dans les graines du pin d'Alep du Kef, mais agit beaucoup moins sur les graines provenant de Kasserine (30 %) et sur celles provenant de Thibar (16 %). En revanche, une irradiation à 3 kGy permet la destruction totale de l'OTA pour l'ensemble des échantillons de graines.

Elaboration d'un cake avec incorporation d'une pâte dégraissée des graines du pin d'Alep

Une nouvelle formule d'un cake à base de graines de pin d'Alep dont on a extrait de l'huile a été réalisée et testée à l'aide d'une analyse sensorielle. Pour ce faire, une dégustation a été réalisée en adoptant une échelle de notation afin de déduire la meilleure formulation en relation avec la quantité de la pâte dégraissée ajoutée aux ingrédients nécessaires à la préparation du cake. Suite à

ce test, le profil sensoriel du produit préparé a permis d'avoir une idée sur les doses de la pâte des graines dégraissée qui ont affecté dans un sens ou un autre les différents critères sensoriels et de préciser parmi les quantités de pâte utilisées, celle qui a été la plus appréciée par les dégustateurs.

L'analyse montre que l'appréciation globale des différents cakes préparés varie d'une personne à une autre. Cette variation est due principalement au goût personnel de chaque sujet et son choix délibéré au cours de la dégustation. Cependant, en dégustant les trois types de cake, les sujets ont senti une amertume plus prononcée dans le cake contenant la quantité la plus élevée (235 g soit un taux de 47%) de pâte dégraissée et un arrière-goût amer persistant dans le cake contenant la quantité intermédiaire de pâte (175 g soit un taux de 35%) par rapport à celui contenant la quantité la plus faible (85 g soit un taux de 17%) de pâte. De point de vue couleur, un taux d'incorporation de 85% de pâte dégraissée, soit une quantité de 235 g, modifie remarquablement la couleur du cake et le rend plus foncé. En ce qui concerne l'odeur du cake, les dégustateurs ont opté pour l'échantillon qui possède la quantité la plus faible de pâte dégraissée contrairement au cake possédant la quantité la plus importante. Pour la texture, l'échantillon le plus privilégié est celui qui possède la quantité la moins importante de pâte dégraissée contrairement à celui contenant la quantité la plus importante. On peut conclure que l'ajout de 85 g de pâte dégraissée des graines du pin d'Alep donne un goût spécifique agréable le mieux apprécié par les dégustateurs.

Conclusion

Les graines du pin d'Alep ont des valeurs nutritionnelles et des vertus médicinales confirmées. Transformées en huile et en pâte, elles gagnent de la valeur, pourraient être utilisées à des fins multiples et avoir des débouchés très promoteurs dans le domaine des industries agro-alimentaires.

Les différents travaux réalisés en Tunisie et rapportés dans ce chapitre montrent le rendement élevé des graines en huiles végétales et leur richesse en composés bénéfiques pour la santé humaine.

Différents procédés telle que la torréfaction ou l'irradiation permettent d'améliorer la durée de conservation et conserver la qualité organoleptique des graines. Par ailleurs, l'amélioration de la durée et des conditions du stockage des graines présente l'avantage d'assurer un meilleur approvisionnement en périodes creuses de mauvaise récolte et contribuer à la création de nouveaux produits (sous forme de pâte ou de poudre) dont la consommation est de plus en plus demandée sur la longueur de l'année.

L'extraction de l'huile apporte une valeur ajoutée par rapport à la graine brute. La transformation du résidu des graines après extraction de l'huile dans le sens de sa valorisation est tout à fait possible et peut donner des produits au goût typique agréable bien apprécié. La préparation d'un cake à base d'une pâte dégraissée est un bel exemple de valorisation de ce résidu et le produit obtenu convient pour une large commercialisation.

Références bibliographiques

- Bessas A., BenMoussa L., Kerarma M. (2008). Dosage biochimique des composés phénoliques dans les dattes et le miel récoltés dans le sud Algérien. Diplôme d'Ingénieur d'Etat en biologie, faculté des sciences, Université Djillah Liabes, Sidi Bel Abbes, Algérie, 81.
- Buckholz L. L., Daun H., Stier E., Trout R. (1980). Influence of roasting time on sensory attributes of fresh roasted peanuts. *Journal of Food Science*, 45(3) : 547-554.
- Chaaben Hayet Motri Samia, Ben Selma Zied, Khantouche Linda, (2015). Comparaison des Huiles des Graines du Laurier, de Pen d'Alep et de Figuier de Barbarie; *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)* Volume 9, Issue 11 Ver. I; PP 30-33.
- Cheikh- Rouhou, S., Hentati, B., Besbes, S., Blecke, C., Deroanne, C., & Attia, H. (2006). Chemical composition and lipid fraction characteristics of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) seeds cultivated in Tunisia. *Food Science and Technology International*, 15(5), 407–415.
- Chokri, M., (2005). Etude de l'effet de l'irradiation sur la conservation de pin d'Alep et sur les mycotoxines. Mémoire pour l'obtention du diplôme de mastère en industries alimentaires. Ecole Supérieure des Industries Alimentaires de Tunis.

- Del Castillo, M. D., Ames, J. M., & Gordon, M. H. (2002). Effect of roasting on the antioxidant activity of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(13) : 3698-3703.
- Durmaz G., Alpaslan M. (2007). Antioxidant properties of roasted apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernel. *Food chemistry*, 100(3) : 1177-1181.
- Hečimović I., Belščak-Cvitanović A., Horžić D., Komes D. (2011). Comparative study of polyphenols and caffeine in different coffee varieties affected by the degree of roasting. *Food chemistry*, 129(3) : 991-1000.
- Jakobek L. (2015). Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins. *Food chemistry* 175: 556-567.
- Kadri, N., Khettal, B., Adjebli, A., Creseteil, T., Yahiaoui-Zaidi, R., Barragan-Montero, V., (2014). Antiangiogenic activity of neutral lipids, glycolipids, and phospholipids fractions of *Pinus halepensis* seeds. *Industrial Crops and Products*, 54, 6–12.
- Khouja M., (2016). Analyse quantitative et qualitative des extraits de certaines populations de pins Tunisiens : Comparaison inter et intra-spécifique. Mémoire pour l'obtention du diplôme de mastère de recherche en Gestion des écosystèmes naturels et valorisation de leurs ressources. Institut National Agronomique de Tunisie.
- Li, K., Li, Q., Li, J., Gao, D., Zhang, T., & Han, Z. (2007). Effect of procyanidins from *Pinus koraiensis* bark on growth inhibition and expression of PCNA and TNF- α in mice with U14 cervical cancer. *Therapy*, 4, 685–690.
- Machiels D. et Istasse L. (2002) La réaction de Maillard: importance et applications en chimie des aliments. *Ann. Méd. Vét*, 146, 347-352.
- Maksimiuk, B. (1970). Occurrence and nature of antibacterial substances in plants affecting *Bacillus thuringiensis* and other entomogenous bacteria. *Journal of Invertebrate Pathology*, 15, 356–361.
- Marquez A., Serratos M. P., Merida J. (2014). Influence of bottle storage time on color, phenolic composition and sensory properties of sweet red wines. *Food chemistry*, 146: 507-514.
- Nasri, N., Khaldi, A., Hammami, M., & Triki, S. (2005). Fatty acid composition of two Tunisian Pine seed oils. *Biotechnology Progress*, 21, 998–1001.
- Nergiz C. et Dënmez 1. (2004) - Chemical composition and nutritive value of *Pinus pinea* L. seeds. *Food Chemistry* 86: 365-368.
- Potta, S. P., Doss, M. X., Hescheler, J., & Sachinidis, A. (2005). Epigallocatechin-3-gallate (EGCG): A structural target for the development of potential therapeutic drugs against anti-proliferative diseases. *Drug Design Reviews*, 2, 85–91.
- Rohdewald, P. (2002). A review of the French maritime pine bark extract (Pycnogenol), an herbal medication with a diverse clinical pharmacology. *International Journal of Clinical Pharmacology and Therapy*, 40, 158–168.
- Ross C. F., Hoyer Jr C., Fernandez Plotka V. C. (2011). Influence of heating on the polyphenolic content and antioxidant activity of grape seed flour. *Journal of food science*, 76(6) : C884-C890.
- Su, X. Y., Wang, Z. Y., & Liu, J. L. (2009). *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of *Pinus koraiensis* seed extract containing phenolic compounds. *Food Chemistry*, 117, 681–686.

- Vasseur J.P., (1991). Ionisation des produits alimentaires. Collection sciences et techniques alimentaires, 444p.
- Watanabe, K., Momose, F., & Handa, H. (1995). Interaction between influenza virus pine cone antitumor substances that inhibit the virus multiplication. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 214(2), 318–323.
- Yaacoub R. (2009). Nutritional and sanitary impact of nuts and seeds roasting: the interest of using fluorescence spectroscopy as a tool to control neoformed compounds (Doctoral dissertation, AgroParisTech).
- Yen, G. H., Pin-Der Duh, P. D., Huang, D. W., Hsu, C. L., & Fu Yu-Chi, T. (2008). Protective effect of pine (*Pinus morrisonicola* Hay.) needle on LDL oxidation and its anti-inflammatory action by modulation of iNOS and COX-2 expression in LPS-stimulated RAW 264.7 macrophages. *Food and Chemical Toxicology*, 46, 175–185.

