

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET ECOLOGIE

N° de série.....

N° d'ordre.....

*Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de
Magistère en Biologie Végétale*

Option

Ecophysiologie et biotechnologie végétale

THEME

**Comportement des semis de Pin d'Alep sous
contraintes thermiques**

Présenté par :

Mr : LAALA Ahmed

Devant la commission d'examen :

Président : Pr BENDERRADJI M^{ed} El Habib

Rapporteur : Pr ALATOU Djamel

Examineur : Pr RAHMOUNE Chaâbane

Examineur : Mc BENTOUATI Abdallah

Université Mentouri Constantine

Université Mentouri Constantine

Université Mentouri Constantine

Université Hadj Lakhdar Batna

2009

REMERCIEMENTS

*Au terme de cette étude, je remercie avant tout **Dieu le Tout Puissant**, de m'avoir donné la foi et le courage et de m'avoir guidé pour l'accomplissement de ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur **ALATOU D**, mon encadreur, qui a bien voulu, par son aimable bienveillance, diriger ce travail qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.*

*Je remercie vivement Mr **BENDERRAJI M H**, professeur à l'Université de Mentouri Constantine, pour avoir accepté de présider le jury et qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.*

*J'exprime mes plus profonds remerciements à Monsieur **RAHMOUNE C**, professeur à l'Université de Mentouri Constantine, d'avoir accepté de juger ce travail et pour tout l'intérêt qu'il m'a accordé.*

*Je n'oublierai pas Monsieur **BENTOUATI A**, maître de conférence à l'Université de Batna qui a bien voulu examiner et juger ce travail.*

Mes plus vifs remerciements vont plus particulièrement :

*A Monsieur **HAFSI M** maître de conférence à l'Université de Sétif, l'initiateur du thème d'ingénierat, que va toute ma reconnaissance pour avoir bien voulu guider et diriger toutes mes recherches et de m'avoir accordé beaucoup d'attention.*

*J'adresse ma chaleureuse et amicale reconnaissance à Monsieur le docteur **BOUKABOUB A** pour sa bienveillance, ces précieux conseils et ces encouragements, ces conseils et son soutien moral m'ont été très utiles.*

*A M^{me} **KANNOUNI M**, pour ses critiques et ses conseils m'ont été précieux pour la rédaction.*

*Aux fonctionnaires de la circonscription des forêts d'El Eulma et particulièrement **MELIZI N**, pour leur soutien et aux fonctionnaires de la subdivision des forêts de la Daira de Beni aziz et Ain Oulemene.*

*Je remercie également Mr **CHEHILI M** pour la correction de certains chapitres du manuscrit.*

*Mes remerciements vont également aux personnels de laboratoire de Biochimie pour leur gentillesse et leur disponibilité, et particulièrement Mr **Amar** pour leurs aides.*

A tous, je dis Merci.

DEDICACE

À mes parents pour toutes les souffrances qu'ils ont endurées pour nous assurer une bonne éducation et nous permettre une vie décente.

À ma femme, non seulement pour m'avoir encouragé à tout moment mais aussi pour avoir eu la patience d'attendre.

À ma très chère adorable : ma nièce « ASSALA », ma source d'amour et d'affection.

À mes chers neveux: Abd El-Alim, Abd El-Djalil et Abd El-Moudjib

À mes sœurs Nassima, Samira, Fouzia et zahra.

À la mémoire vénérée de mon beau frère « Mourad » qu'il trouve en ce travail tout mon respect posthume.

À mon beau frère Ryda pour son soutien et ses conseils.

À le fiancé de ma sœur : Ibrahim

À mes meilleurs amis et particulièrement : Mourad, Rabeh, Chems Eldin, Mouhamed, Abd el Hamid et Nadhir.

À toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

À toutes les personnes qui m'ont dit « Non ».

À mon pays.

*Je dédie ce travail
Laala Ahmed*

Liste des abréviations

Variables Diverses :

Ap	Anciennes pousses
Jp	Jeunes pousses
T	Tige
R	Racine

Variables morphologiques :

LPA	Longueur de la partie aérienne
LPR	Longueur de la partie racinaire
PSA	Poids sec de la partie aérienne
PSR	Pois sec de la partie racinaire
LR/LT	Rapport longueur tige / longueur racine
TRC	Taux relatif de croissance
VAT	Vitesse d'allongement des tiges
VAR	Vitesse d'allongement des racines

Variables biochimiques :

Ch a	Chlorophylle a
Ch b	Chlorophylle b
Ch a+b	Chlorophylle totale
Ch a/b	Le rapport chlorophyllien

Sommaire

Introduction	1
Première partie: Synthèse bibliographique	
Chapitre 1 : Données générales sur le pin d'Alep	
1.1- Aire de répartition géographique du pin d'Alep.....	4
1.2- Répartition du pin d'Alep en Algérie	5
1.3- Caractères botaniques	6
1.4- Plasticité écologique du pin d'Alep	6
Chapitre 2 : Le stress	
2.1- Notion du stress.....	9
2.2- Sensibilités des plantes aux stress abiotiques	11
2.3- Le stress thermique	11
2.3.1- Stress induit par les températures élevées	12
2.3.1.1- Effets des hautes températures sur les fonctions physiologiques.....	12
2.3.1.2 -Les mécanismes de tolérance à la chaleur	14
2.3.2- Les stress provoqués par les basses températures	16
2.3.2.1- Le froid et ses effets.....	16
2.3.2.2- Le gel	18
2.3.2.2.1-Les mécanismes de défens	18
2.3.2.3- L'endurcissement.....	19
2.3.2.3.1- Changements biochimiques associés à l'endurcissement au froid.....	19
a)- Les hydrates de carbonés (Sucres)	19
b)- Métabolisme azoté	21
2.4- Les échanges gazeux foliaires.....	23
2.4.1- Mécanisme d'ouverture des stomates	23
2.4.2- Influence des facteurs internes et externes sur le fonctionnement des stomates.....	24
2.4.2.1- Facteurs internes.....	24
2.4.2.2- Facteurs externes.....	24
Deuxième partie : Présentation de la zone d'étude et matériels et méthodes	
Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude	
1.1- Localisation et caractérisation physique de la région d'étude	28
1.2- Caractérisation climatique de la région d'étude.....	29
1.2.1- Les précipitations	29
1.2.2- La température	32
A) - Températures moyennes mensuelles	32
B)- Températures maximales.....	33
C)- Températures minimales.....	33
D)- Température moyenne annuelle.....	33
E)- L'amplitude thermique	34
1.2.3- Synthèse bioclimatique	34

1.2.3.1- Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen	34
1.2.3.2- Quotient pluviothermique d'Emberger	35
1.2.3.2.1- Situation de la pinède de la région de Sétif dans le climagramme d'Emberger	36
1.2.3.2.2- Variation annuelle du Q2 durant la période de 1998-2007.....	39
1.2.3.3- Autres indices climatiques	40
1.2.4- Autres facteurs climatiques	42
1.3- Conclusion	44

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

2.1- Matériel végétal.....	45
2.2- Méthodes d'étude	45
2.2.1- Dispositifs expérimentaux	45
2.2.1.1- Expérimentation en milieu contrôlé (chambre de culture)	45
2.2.1.2- Expérimentation en milieu naturel	46
2.2.2- Traitements thermiques appliqués	46
2.2.3- Paramètres biochimiques	46
2.2.4- Mesure de la résistance stomatique	47
2.2.5- Paramètres morphologiques	47
2.2.6- L'étude statistique.....	48

Troisième partie : Résultats et discussions

Chapitre 1 : Réponses physiologiques du pin d'Alep au stress thermique

1-1- Traitements thermiques à basse température	50
1-1-1-La proline	50
1.1.2- Les sucres solubles	51
1.1.3 - Les protéines	52
1.1.4 - La chlorophylle	54
1.1.5- Corrélation entre les variables.....	57
1.2- Traitements thermiques à haute température	59
1.2.1-La proline	59
1.2.2-Les sucres solubles	60
1.2.3 -Les protéines.....	61
1.2.4 – La chlorophylle	62
1.2.5- Corrélation entre les variables	66
1.3- Caractéristiques des traitements thermiques appliquées	67
1.3.1- Accumulation des marqueurs biochimiques au niveau de la plante entière en fonction des traitements thermiques.....	68
1.3.1.1- La proline.....	68
1.3.1.2- Les sucres solubles	69
1.3.1.3- Les protéines	70
1.3.1.4- La chlorophylle totale	71

Chapitre 2 : Analyses des données climatiques

2.1- Analyse statistique descriptive des températures.....	73
2.1.1- Les températures minimales	73
2.1.2- Les températures maximales	74

2.2- Tendances thermiques des saisons	75
2.2.1-Evolution des températures minimales de la saison hivernale pour la période 2001-2007	76
2.2.2-Evolution des températures maximales de la saison estivales pour la période 2001-2007	77
2.3- Stress enregistrés durant les trois années (2005, 2006 et 2007)	77
2.3.1- Les températures fraîches inférieures à $m= 2^{\circ}\text{C}$	78
2.3.1.1- Stress enregistrés durant la période (2005-2007) où les basses températures inférieures à 2°C ont durée plus de 24 heures	80
2.3.2- Les températures chaudes supérieures à $M=34^{\circ}\text{C}$	82
2.3.2.1- Stress enregistrés durant la période (2005-2007) où les hautes températures supérieures à 34°C ont durée plus de 12heures.....	83
2.4- Conditions climatiques de l'année expérimentale (2007-2008)	85
2.4.1- Pluviosité	85
2.4.2- Les températures	86
a) -La saison hivernale	87
b)- La saison printanière	88
c)- La saison estivale.....	88
d)-La saison automnale.....	88
2.4.3- Les températures extrêmes (minimales et maximales)	89
2.4.4- Traitements des températures tri-horaires de l'année expérimentale (2007-2008)	90
2.4.4.1-Durées et fréquences des températures fraîches	90
2.4.4.2- Durées et fréquences des températures chaudes	91
2.4.5- Les stress enregistrées durant l'année expérimentale (2007-2008)	92
2.4.5.1- Les basses températures (inférieures à $m= 2^{\circ}\text{C}$)	92
2.4.5.2- Les températures chaudes (supérieures à $M= 34^{\circ}\text{C}$)	95
Chapitre 3 : Estimation des paramètres biochimiques des semis de pin d'Alep en conditions naturelles	
3.1- Proline	98
a)-La saison hivernale	98
b)-La saison printanière	99
c)-La saison estivale	99
d)-La saison automnale	100
3.1.1- Effet des variations thermiques saisonnière sur les teneurs en proline	101
3.2- Sucres solubles.....	103
a)- La saison hivernale	103
b)-La saison printanière	103
c)-La saison estivale	104
d)-La saison automnale	105
3.2.1- Effet des variations thermiques inter-saisonnière sur les teneurs en sucres solubles.....	105
3.3- Chlorophylle.....	107
a)- La saison hivernale	107
b)- La saison printanière.....	109
c)- La saison estivale	110
d)- La saison automnale	112

3.3.1- Effet des variations thermiques saisonnières sur les teneurs en chlorophylle	114
3.4- Corrélation entre les variables	119
3.5- Evolution temporelle des marqueurs biochimiques	119
a)- Evolution de la teneur en proline chez les semis de pin d'Alep en fonction des saisons	120
b)- Evolution de la teneur en sucres solubles chez les semis de pin d'Alep au cours des saisons ...	120
c)- Evolution de la teneur en chlorophylle totale chez les semis de pin d'Alep au cours des saisons.	121
3.6- Variation de la résistance stomatique en fonction de la température	122
3.6.1- Evolution journalière de la résistance stomatique	123
3.6.2- Relation entre la température et la lumière avec la résistance stomatique.....	124
Chapitre 4 : Effet des variations thermiques saisonnières sur les paramètres morphologiques	
4.1- Longueur de la partie aérienne (LPA)	125
4.2- Longueur de la partie racinaire.....	126
4.3- Rapport de la longueur partie racinaire / longueur partie aérienne (LPR/LPA)	128
4.4- Poids sec de la partie aérienne (PSA)	129
4.5- Poids sec de la partie racinaire (PSR)	130
4.6- Taux relatif de croissance (TRC)	130
4.7- Rapport de biomasse (PSR/PSA)	131
4.8- Corrélation entre les paramètres morphologiques.....	132
4.9- Taux de mortalité	132
4.10- Discussion	133
Conclusion	145
Références bibliographiques	
Annexes	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des photos	
Résumé	

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La physiologie et la productivité de la végétation forestière sont directement affectées par la température, la disponibilité des nutriments, le régime hydrique et indirectement par l'interaction interspécifique (Graumlich 1993).

Selon plusieurs auteurs, les événements de température extrêmes sont à l'origine de problèmes plus importants que ceux liés à un léger changement de la température moyenne, par exemple, des épisodes de gel-dégel en hiver, de gels hâtifs à l'automne, de gels tardifs au printemps, de canicule ; pourraient causer des dommages aux écosystèmes. Les dégâts dépendront non seulement de la température extrême, mais aussi de la durée d'exposition, des caractéristiques de fluctuations thermiques (augmentation ou diminution, vitesse de variation et écarts entre maxima et minima de température) et de l'état physiologique de la plante au moment où se produisent ces phénomènes (Quamme, 1987 in Richer *et al.*, 2001).

Il est difficile d'évaluer avec précision l'effet global à long terme qu'aura l'ensemble des changements climatiques sur la productivité des écosystèmes car les augmentations prédites de température affectent dans des sens différents les processus physiologiques à la base de la croissance des végétaux.

En réponse au stress thermique, beaucoup d'espèces simulent des changements significatifs sur le plan morphologique et métabolique. Parmi ces espèces, le pin d'Alep, essence circumméditerranéenne occupe la plus grande superficie en Algérie, soit 863.858 ha, reparti essentiellement dans le semi aride où il est climacique, il peut monter en altitude jusqu'à la limite de 1200m où il est en contact avec le chêne vert et le cèdre, il prospère à la limite de l'isohyète 300mm. C'est l'essence forestière par excellence dans notre pays, son amplitude écologique est très vaste et demeure l'espèce importante par sa production ligneuse, néanmoins avec les perturbations climatiques actuelles, à savoir les précipitations irrégulières, parfois déficientes, une période de sécheresse assez longue et des amplitudes thermiques très marquées, l'espèce subit des stress importants qui influent négativement sur la croissance radiale et la production ligneuse.

C'est dans ce contexte, que notre étude se veut à la fois la connaissance de l'éventail thermique de cette espèce et sa réaction éco-physiologique vis-à-vis du stress thermique, tout en essayant de comprendre sa capacité d'adaptation par des marqueurs biochimiques (la proline, les sucres solubles, les protéines et la chlorophylle).

Deux expérimentations ont été mises en œuvre, à savoir, l'application des traitements thermiques de hautes et basses températures, alors que la seconde consiste à quantifier la variation des marqueurs biochimiques durant les quatre saisons de l'année 2007-2008. L'accumulation de ces marqueurs biochimiques au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep peut nous indiquer les principales perturbations physiologiques des semis (tolérance ou sensibilité).

Nous avons envisagé aussi, au cours de ce travail, d'estimer la régulation stomatique des échanges gazeux foliaires en conditions de stress thermiques.

Partie 1

**Synthèse
bibliographique**

Chapitre 1 : Données générales sur le pin d'Alep

Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) est un taxon typiquement méditerranéen, il appartient à la classe des végétaux qui sont aussi appelés résineux, du fait de l'existence d'un appareil sécréteur de résine. Elle est représentée par l'ordre des coniférales, cet ordre doit son nom à la présence de cônes (Messaili, 1995).

1.1- Aire de répartition géographique du pin d'Alep:

Le pin d'Alep est largement répandu sur l'ensemble du pourtour du bassin méditerranéen (Barbero *et al.*, 1998). C'est une espèce fréquente, surtout en région méditerranéenne occidentale, mais elle se rencontre également en divers endroits du bassin méditerranéen oriental (Fig.1). Au total, les forêts de pin d'Alep occupent sans doute plus de 3.5 millions d'hectares (Quezel, 1980).

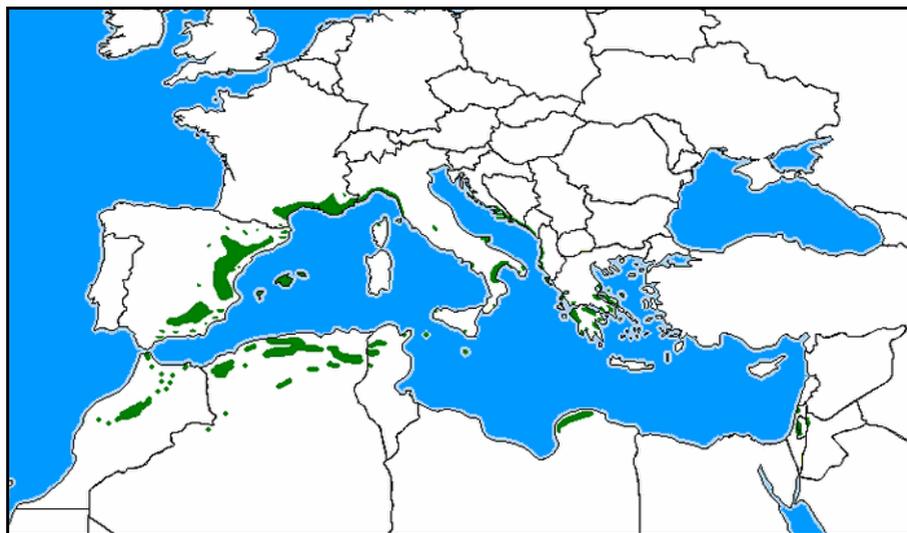


Fig.1 : Aire de répartition du pin d'Alep (Quezel, 1980)

Au Maroc, le pin d'Alep est peu fréquent à l'état spontané, il occupe une superficie de 65.000 hectares (Quezel, 1986). En Tunisie, les forêts naturelles de pin d'Alep couvrent 170.000 hectares, occupant ainsi tous les étages bioclimatiques depuis la mer jusqu'à l'étage méditerranéen semi- aride (Souleres, 1969 ; Chakroun, 1986).

En Europe, le pin d'Alep est surtout présent sur le littoral espagnol où il couvre une superficie de 1.046.978 hectares en peuplements purs et 497.709 hectares en peuplements mixtes ou mélangés avec d'autres espèces (Montero, 2001). En France, Couhert et Duplat (1993) avancent le chiffre de 202.000 hectares. Il existe aussi à l'état spontané mais d'une

façon très restreinte en Turquie, en Albanie et en Yougoslavie et très peu au proche orient (Palestine, Jordanie, Syrie et Liban) (Seigue, 1985).

1.2- Répartition du pin d'Alep en Algérie :

Le pin d'Alep couvre 35% des surfaces boisées de l'Algérie du Nord (Mezali, 2003). Sur la base des différents travaux, la superficie du pin d'Alep est récapitulée dans le tableau suivant :

Tab.1: Superficies du pin d'Alep en Algérie (en ha)

Années	1955 (Boudy)	1985 (Seigue)	1997 (Ghazi et Lahouati)	2000 (RNE)	2005 (DGF)
Superficie (ha)	852.000	855.000	800.000	881.000	863.858

La comparaison des données de la direction générale des forêts (2005) avec celles de Boudy (1955) met en évidence malgré une incertitude sur l'homogénéité des définitions, la stabilité et la progression des surfaces de pin d'Alep imputable pour partie à l'importance des plantations auxquelles il a donné lieu sur des centaines de milliers d'hectares au cours de ces dernières décennies.

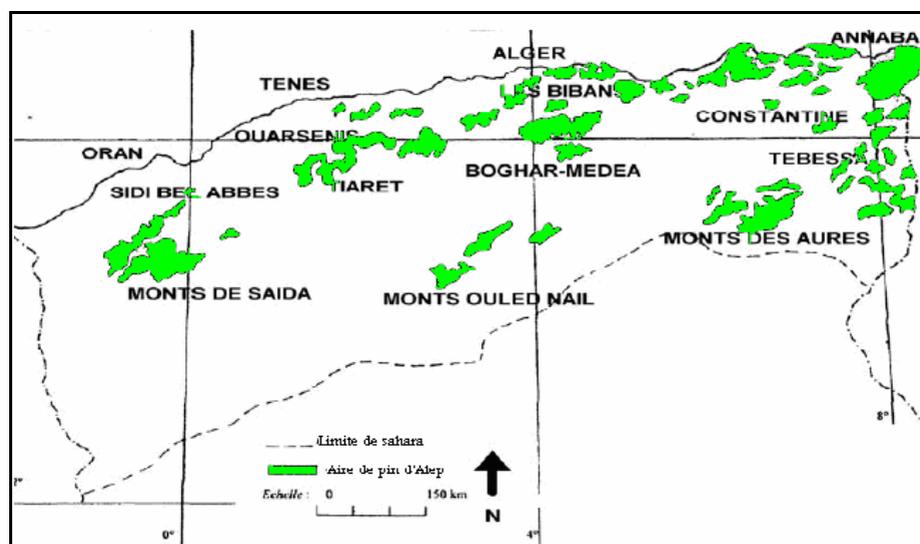


Fig.2 : Aire de répartition du pin d'Alep en Algérie
Source: Seigue (1985)

Il est présent partout, d'Est en Ouest allant du niveau de la mer aux grands massifs montagneux du Tell littoral et de L'Atlas Saharien (Fig.2). Son optimum de croissance et de développement se situe au niveau des versants Nord de l'Atlas saharien où il constitue des forêts importantes et l'on peut citer à l'Est, les grands massifs de Tébessa avec 90.000 hectares, celui des Aurès avec plus de 100.000 hectares constitués principalement par les

pinèdes des Béni-Imloul (72.000 ha), des Ouled Yagoub et celle des Béni - Oudjana (Kadik, 1987).

Au centre du pays, on peut signaler les forêts de Médéa- Boghar, de Theniet El Had qui totalisent respectivement 52.000 et 47.000 hectares et les vieilles futaies des Monts des Ouled Nail dans la région de Djelfa. A l'ouest du pays, en Oranie, on peut trouver de vastes massifs concentrés dans les régions de Bel Abbés, de Saida et de l'Ouarsenis (Mezali, 2003).

1.3- Caractères botaniques:

Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) est une espèce très caractéristique qui existe à l'état spontané presque dans tout le nord algérien où il peut atteindre 30m de hauteur. Sa longévité est estimée à 150 ans avec une moyenne de 100 à 120 ans (Kadik, 1987). Les feuilles ont un caractère xérophytique, elles sont en aiguilles. L'écorce est gris argentée et lisse chez les jeunes arbres, puis brune rougeâtre, en écaille mince et large chez les plus âgés (Nahal, 1962). Le pin d'Alep est un arbre polycyclique, susceptible d'effectuer plusieurs pousses par an et de produire des faux cernes (Serre, 1973).

1.4- Plasticité écologique du pin d'Alep :

Il faut noter que le pin d'Alep occupe en altitude des positions très variables, si en France, il se situe pratiquement toujours à moins de 800m d'altitude (Parde, 1957), en Algérie, il atteint fréquemment 1500m et même 2000m d'altitude dans l'Atlas saharien, et il trouve un optimum de développement à des altitudes allant de 600 à 1200m dans le Tell et de 900 à 1400m dans le sud saharien (Kadik, 1987).

Sur le plan bioclimatique, le pin d'Alep se rencontre dans les différents étages : Aride supérieur, semi-aride, sub-humide et humide. Toutefois, c'est dans l'étage semi-aride qu'il trouve son plein épanouissement (Nahal, 1986). La large distribution du pin d'Alep qui va du Littoral au Sahara lui confère l'aptitude de végéter dans des tranches pluviométrique qui varient de 200mm dans l'Atlas Saharien jusqu'à 1500mm au Littoral, il présente un optimum de développement entre 350 et 700mm de précipitations annuelles (Nahal, 1962 in Quezel, 1980).

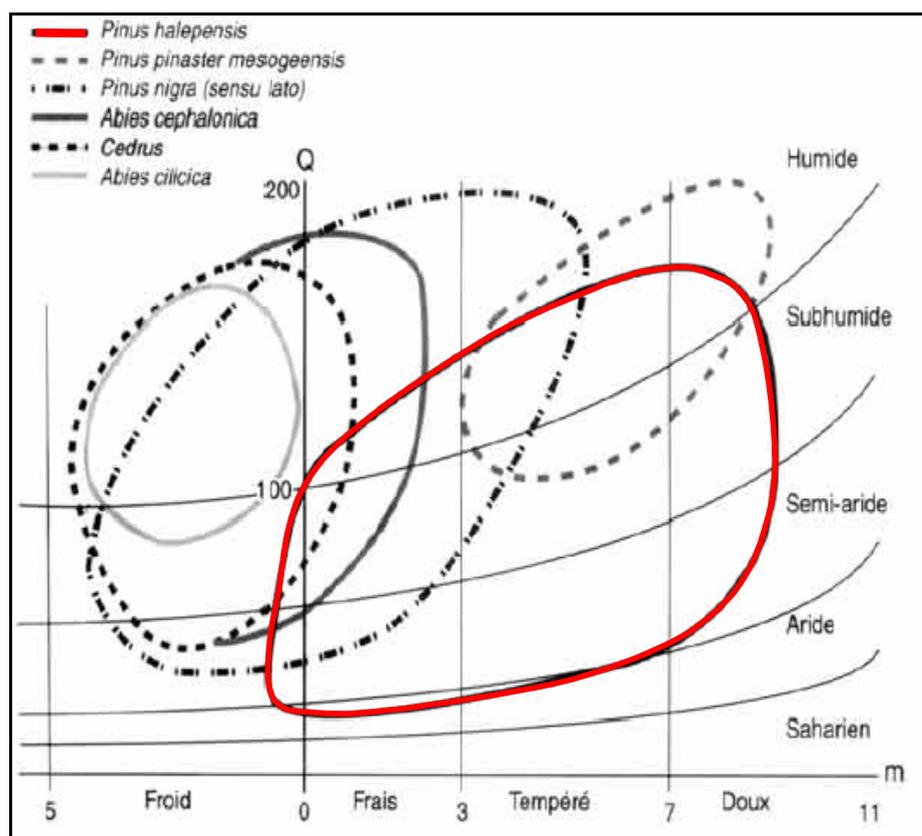


Fig.3: Aire de répartition de quelques conifères en fonction du coefficient pluviométrique d'Emberger et de la moyenne des minima du mois le plus froid (Quezel, 1986)

Sur le plan thermique, l'aire naturelle du pin d'Alep admet une variante humide et semi-aride, froide à chaude avec des valeurs moyennes de températures minimales du mois le plus froid de -3° à $+10^{\circ}\text{C}$ (Quezel, 1986) (Fig.3). Le pin d'Alep peut supporter des froids accidentels de -15 à -18°C , à condition qu'ils restent exceptionnels et de courte durée. Ces froids laissent toujours une trace provoquant quelquefois la mort des arbres, mais toujours une coloration rousse des feuilles et un ralentissement de croissance pendant une ou plusieurs années (Bedel, 1986).

En Algérie, les températures moyennes minimales quant à elles permettent au pin d'Alep de se développer au Tell dans l'intervalle de 5.8°C et -0.6°C (Kadik, 1987). Alcaraz, (1982) avance une valeur de $m=-1.9^{\circ}\text{C}$ à Djebel Mekaidou et 4.2°C à Djebel Saharidj pour le développement du pin d'Alep au Tell oranais. Ainsi, il peut supporter des températures extrêmes de -12°C et 43°C (Celles, 1975 in Hamdane, 1995).

Il se développe en outre dans les limites de températures moyennes annuelles comprises entre 13°C et 18.35°C . Le pin d'Alep étant une espèce thermophile par excellence,

pouvant résister à des températures très élevées. Son optimum de développement est enregistré entre les températures moyennes maximales de 32°C et 33°C (Kadik, 1987).

Du point de vue édaphique, le pin d'Alep est une espèce indifférente à la nature du sol. Il préfère les substrats marneux et calcaro-marneux, où les sols sont profonds permettant une bonne pénétration du système racinaire (Quezel, 1986). Comme il supporte un taux élevé de calcaire, il est pionnier des sols squelettiques (Lanier, 1986). Toutefois, il faut noter que c'est une espèce qui craint l'hydromorphie et ne peut prospérer dans les dépressions où l'eau s'accumule, l'exposant ainsi à l'asphyxie racinaire (Seigue, 1985).

Chapitre 2 : Le stress**2.1- Notion du stress :**

Le stress correspond à toute condition de l'environnement ou combinaison de conditions qui empêche la plante de réaliser l'expression de son potentiel génétique pour la croissance, le développement et la reproduction. Chez les plantes cultivées, la baisse du rendement due à ces conditions peut atteindre 50% (Jones et Qualset, 1984).

Les principaux stress peuvent être classés, tout dépendant de la nature de l'agent stressant, en deux catégories : biotique et abiotique (Orcutt et Nilsen, 2000).

- Les stress biotiques :

Les stress biotiques sont nombreux et ont pour origine les virus, les organismes phytophages, les pathogènes et les compétitions intraspécifiques et interspécifiques. Afin d'y faire face, les plantes mettent en place un système de défense faisant intervenir une chaîne de réactions.

- Les stress abiotiques :

Les plantes se trouvent rarement dans des conditions environnementales optimales, mais elles se trouvent souvent dans des conditions extrêmes de potentiel hydrique, de température, de salinité ainsi que d'autres facteurs qui amènent les organismes à la limite de la survie (Fig.4).

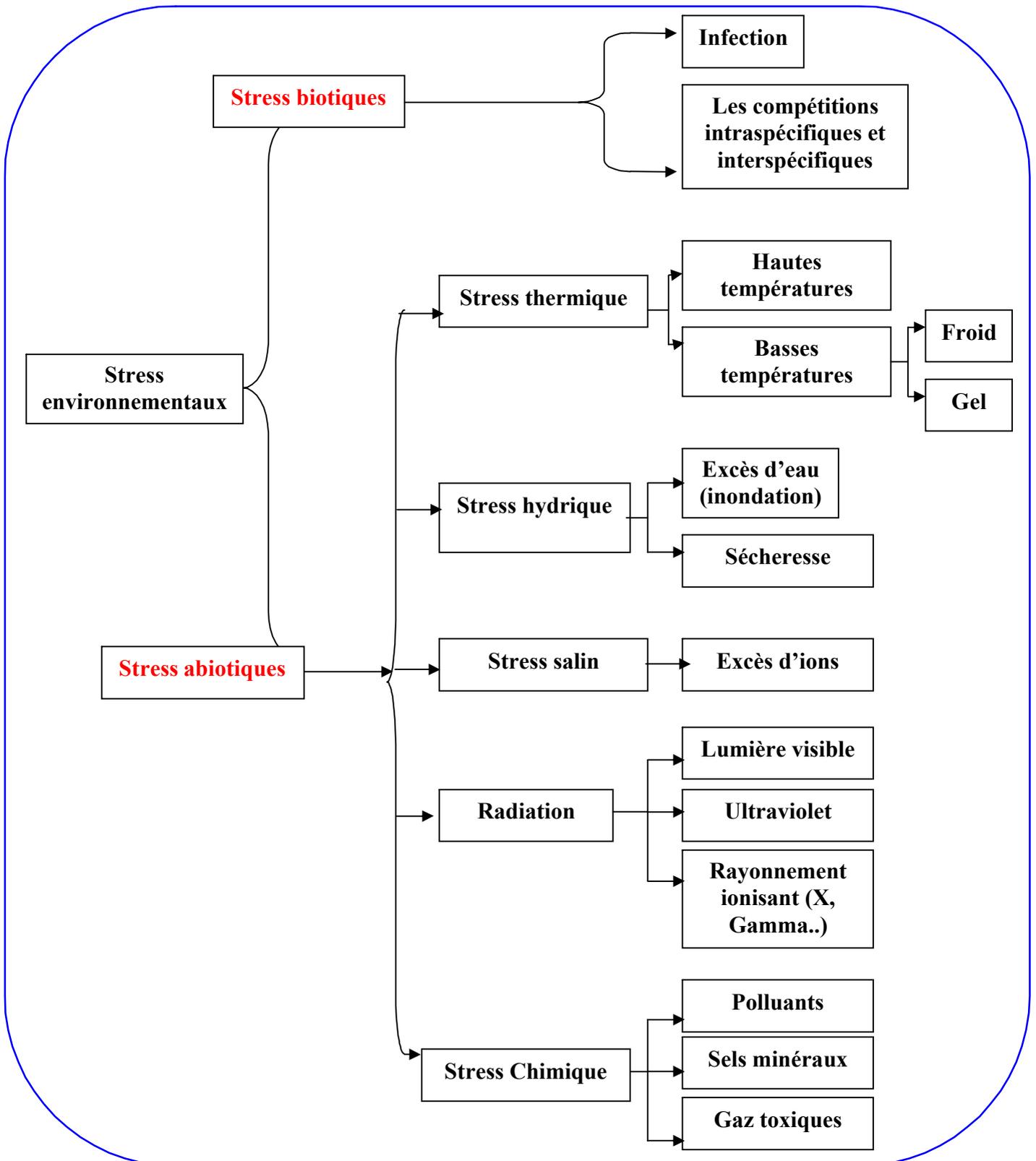


Fig.4 : Principaux stress environnementaux auxquels les plantes sont confrontées (d'après Schulze *et al.*, 2002)

2.2- Sensibilités des plantes aux stress abiotiques :

Certaines plantes peuvent subir des lésions provoquées par un stress, ce qui signifie qu'elles peuvent montrer des dysfonctionnements métaboliques. Si le stress est léger et de courte durée, la lésion peut être temporaire et la plante peut guérir lorsqu'il est éliminé. S'il est par contre suffisamment important, il peut inhiber la floraison et la production des graines ou encore empêcher la survie de la plante (Hopkins, 2003). Ainsi, la capacité d'une plante à supporter le stress est variable suivant son stade de développement, le moment le plus critique étant pendant les phases de reproduction (Fig.5).

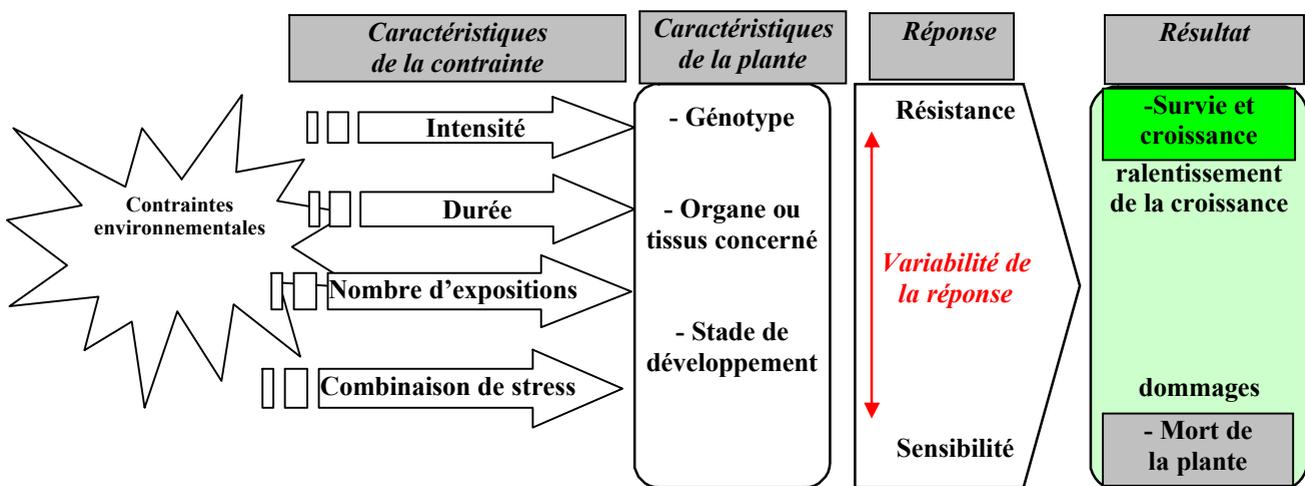


Fig.5 : Facteurs conditionnant la réponse de la plante à un stress abiotique (d'après : Bray et al., 2000 in Touchard, 2006)

En outre, l'impact de la plupart des stress environnementaux sur la plante ne varie pas toujours dans le même sens ou avec la même intensité selon les espèces. Par exemple, l'utilisation de la lumière s'avère être différente entre la majorité des arbres feuillus et un certain nombre de résineux (Roussel, 1970).

2.3- Le stress thermique :

La température est un paramètre environnemental important pour le métabolisme et la croissance de la plante, elle constitue donc, au même titre que la lumière et le manque d'eau, l'un des stress environnementaux les plus limitants pour la production de la plante (Kramer et Boyer, 1995).

Il y a deux formes principales de stress thermique sur les cultures: un stress plus fréquent de haute température (la chaleur) et un stress moins fréquent de température faible (le froid).

2.3.1- Stress induit par les températures élevées :

La plupart des plantes cultivées craignent les hautes températures, même pendant des laps de temps courts. Une température de l'air entre 45 et 55°C pendant une demi-heure abîme directement les feuilles des plantes dans la plupart des cas, et même des températures plus basses (entre 35 et 40°C) peuvent être graves si elles persistent (Hopkins, 2003).

2.3.1.1- Effets des hautes températures sur les fonctions physiologiques :

- La photosynthèse:

Pendant les stades végétatifs des plantes, les températures élevées peuvent endommager des composants de l'appareil photosynthétique des feuilles, réduisant ainsi les taux d'assimilation d'anhydride carbonique (Al-Khatib et Paulsen, 1999 in Oukarroum, 2007).

Guilioni et Tardieu (1997) ont étudié l'effet de courtes périodes de hautes températures sur la croissance et le développement du pois. Les résultats obtenus montrent que la température élevée réduit, de manière réversible, la photosynthèse nette et l'efficacité biologique de conversion du rayonnement absorbé en matière sèche.

De même, il est apparu que l'enveloppe du chloroplaste était plus résistante à la température que les membranes formant les thylacoïdes: c'était donc bien les processus se déroulant à l'intérieur du chloroplaste qui étaient endommagés par les températures élevées. Plusieurs études montrent que le photosystème II et le complexe producteur d'oxygène qui lui est associé, sont particulièrement sensibles à l'endommagement (Berry et Bjorkman, 1980).

Les fortes températures accélèrent le dessèchement des feuilles et interviennent aussi spécifiquement sur la physiologie, notamment en inhibant la photosynthèse puis en dégradant les pigments, en particulier les chlorophylles. Les résultats obtenus par Graham et McDonald (2001), à partir de travaux réalisés sur deux génotypes de blé soumis à un stress thermique, montrent que la haute température a réduit la concentration en chlorophylle des deux génotypes. Ainsi la

synthèse de chlorophylle totale (a et b) est inhibée de 70% environ chez des plantules étiolées de concombre mises à la lumière dans une chambre de culture à 42°C (Cornic, 2007).

- Les membranes:

Les parois et les membranes des organites cellulaires jouent un rôle vital dans le fonctionnement des cellules. Les hautes températures peuvent endommager ces membranes (la membrane nucléaire, la membrane de la réticulum endoplasmique, de la mitochondrie et du chloroplaste (Amutha *et al.*, 2007).

Une lésion aux membranes due à un stress soudain de chaleur peut provenir soit de la dénaturation des protéines membranaires soit de la fonte des lipides membranaires qui conduit à la rupture des membranes et à la perte du contenu cellulaire (Ahrens et Ingram, 1988).

- La respiration :

L'action de la température sur la respiration est analogue à celle que l'on rencontre pour tous les phénomènes métaboliques, avec une montée sensiblement conforme à la lois d'Arrhenius, de 0 à 40°C ou 50°C puis une brusque redescente qui traduit la dénaturation des protéines (Heller *et al.*, 1989).

King *et al.*, (2006) montrent que l'augmentation de la respiration végétale en situation de hausse des températures est en fait une réponse transitoire au changement : une fois adaptées, les plantes ont une respiration équivalente à celle de la température précédente.

- La croissance :

L'effet de la température sur la croissance et la résultante de son action sur la photosynthèse et les réactions métaboliques mais aussi sur l'alimentation hydrique et minérale. (Heller *et al.*, 1989). Les résultats obtenus par Natarajan (2005), à partir de travaux réalisés sur deux espèces *Salvia Splendens* et *Viola X Wittrockana*, soumises à un stress thermique, montrent que les hautes températures de courte durée provoquent le ralentissement de la croissance en hauteur et en épaisseur de ces deux espèces.

2.3.1.2 -Les mécanismes de tolérance à la chaleur :

Les mécanismes de tolérance sont variés, les plantes ont mis au point plusieurs mécanismes adaptatifs thermotolérants qui leur permettent de tolérer les hautes températures.

Il existe trois aspects majeurs de thermotolérance:

- (1) la dépendance thermique au niveau biochimique et métabolique;
- (2) la tolérance thermique en relation avec la stabilité membranaire;
- (3) la production de protéines de choc thermique;

- Les processus biochimiques :

Les effets de la température sur les vitesses de réactions biochimiques peuvent être modélisés comme le produit de deux fonctions, une vitesse de réaction progressive croissant exponentiellement et une chute exponentielle résultant d'une dénaturation enzymatique avec l'augmentation de la température (Fig.6). La grande préoccupation est de savoir s'il est possible d'accroître la limite supérieure de la stabilité enzymatique pour empêcher la dénaturation.

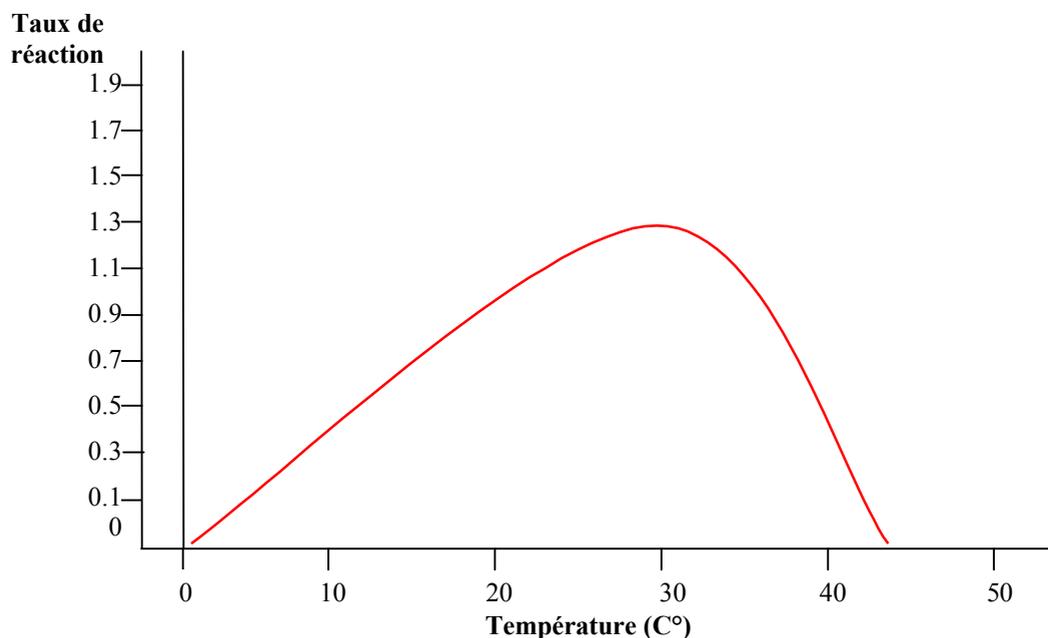


Fig.6: Taux exponentiel de réaction en fonction de la température (d'après Abrol et Ingram, 1997)

La défaillance d'un seul système enzymatique critique peut causer la mort d'un organisme. Ce fait peut expliquer pourquoi la plupart des espèces cultivées survivent à des températures élevées prolongées jusqu'à une gamme assez étroite de 40 à 45 °C (Senioniti *et al.*, 1986).

La dépendance thermique de la vitesse apparente de réaction pour des enzymes sélectionnées peut indiquer la gamme thermique optimale pour une plante. La gamme dans laquelle la constante apparente de Michaelis-Menten pour le CO₂ (K_m) est minimale et stable est appelée la fenêtre cinétique thermique (Mahan *et al.*, 1987).

- La stabilité thermique des membranes cellulaires :

Le stress thermique (chaleur) provoque la peroxydation des lipides membranaires. La synthèse renforcée d'un anti-oxydant par les tissus végétaux peut accroître la tolérance cellulaire à la chaleur (Upadhyaya *et al.*, 1991). Chez *Arabidopsis* exposé à des températures élevées, une augmentation en acides gras saturés dans les membranes accroît leur température de fonte et donc la tolérance à la chaleur (Kunst *et al.*, 1989 in Abrol et Ingram, 1997).

- Les protéines du choc thermique (HSP):

La réponse à la chaleur se traduit par la production de protéines spécifiques que l'on appelle les « heat shock proteins » ou HSP. Elles sont classées selon leur masse moléculaire (en kDa) et l'on distingue les HSP100, les HSP90, les HSP70, les HSP60 et les HSP de faible masse moléculaire entre 10 et 30 kDa (LMW HSP : Low Molecular Weight HSP). Les plantes sont caractérisées par une grande production de ces petites HSP suivant une exposition à forte température (Cornic, 2007). Elles peuvent jouer un rôle structurel pour conserver l'intégrité de la membrane cellulaire pendant le stress (Pelham, 1986 in Dubois, 1991).

Les protéines HSP 70 et HSP 90 joueraient un rôle dans la structure et l'assemblage des protéines au sein du cytoplasme et du réticulum endoplasmique, ces protéines peuvent, d'autre part, participer au réassemblage des structures cellulaires endommagées par le choc de température. L'induction de l'expression de HSP70 lors d'un stress était associée au développement d'une tolérance cellulaire vis-à-vis d'un stress ultérieur. Elles jouent également un rôle très important dans les processus de différenciation et de développement cellulaire (Pelham, 1986 in Dubois, 1991).

2.3.2- Les stress provoqués par les basses températures :

Il y a deux formes de stress thermique provoqué par les basses températures: le froid et le gel.

2.3.2.1- Le froid et ses effets:

- Sur les biomembranes :

De nombreuses espèces d'origine tropicale ou subtropicale dites thermophiles présentent des dommages plus ou moins réversibles lorsqu'elles sont soumises à des températures comprises entre 0 et 15°C. Les symptômes vont d'une mauvaise germination à des dégâts de conservation après récolte, en passant par le blocage de la croissance et de ses processus essentiels (photosynthèse, respiration et translocation en particulier). La cause biologique ultime la plus souvent citée de tous les phénomènes liés à la sensibilité au froid est sans doute le fonctionnement des membranes cellulaires (et des enzymes liés), en particulier en relation avec l'état physique de leurs lipides (Côme, 1992).

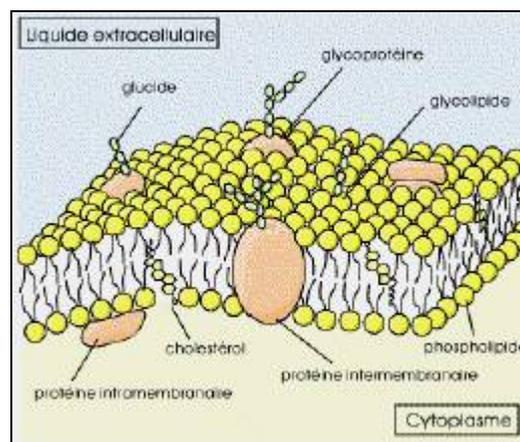


Fig.7 : La membrane cellulaire (modèle de SINGER et NICOLSON)

Des températures supérieures à 0°C mais inférieures à 10°C rigidifient les lipides membranaires de plantes tropicales, alors de multiples dérégulations physiologiques s'installent conduisant à des nécroses et la mort des tissus. Ainsi, à basse température les protéines intégrées s'agglomèrent dans les zones lipides fluides, donc le froid induit une redistribution de ces protéines (Côme, 1992).

- Sur les mouvements de solutés :

Les mouvements de solutés qui se déroulent dans les tissus spécialisés (xylème pour la sève brute, phloème pour la sève élaborée) ou le long d'organes spécialisés dans le fonctionnement de transport (tige, pétiole) sont affectés par l'abaissement de la température (Côme, 1992). Donc les transports de métabolites d'un organe à l'autre sont plus difficiles par le froid, ce qui favorise l'accumulation de certains constituants (glucides solubles, acides aminés libres...) (Côme, 1992).

- Sur l'efficacité de la photosynthèse :

Le rendement quantique de l'incorporation de CO₂ varie selon les espèces et selon la température. Chez les plantes de type C3, le rendement quantique de l'incorporation de CO₂ augmente lorsque la température diminue de 40 à 10°C, cependant les espèces en C4 ne présentent pas cette dépendance vis-à-vis de la température (Havaux et Lannoye, 1985). Ainsi, lors d'un éclaircissement intense, le froid peut causer des dégâts au niveau des membranes de thylakoides en provoquant une inhibition de la synthèse des chlorophylles et une dégradation des pigments photorécepteurs (Havaux et Lannoye, 1985).

Méthy et Trabaud (1990) ont étudié la capacité de résistance au froid du système photosynthétique de deux espèces sclérophylles de la région méditerranéenne (*Quercus ilex* et *Quercus coccifera*). Les résultats obtenus montrent que la vitesse de fluorescence, qui traduit l'activité du PSII, semble relativement peu affectée par plusieurs heures d'exposition à -5°C comme à -10°C. En revanche, à -15°C et surtout à -20°C, il y a une réduction très rapide de l'activité photosynthétique.

- Sur la respiration :

Le rôle de la respiration est de fournir une source d'énergie utilisable (ATP) par toutes les réactions du métabolisme cellulaire. Entre 0-20°C l'abaissement de la température provoque une diminution de l'intensité respiratoire. Par exemple chez la pomme de terre, la respiration augmente si les tubercules sont maintenus à des températures inférieures à 8°C, cette élévation est due à une activation de la phosphorylase qui dégrade l'amidon (Côme, 1992).

- Sur la morphologie des plantes (Thermomorphoses):

La température peut provoquer des effets morphologiques que l'on appelle des thermomorphoses, des températures basses peuvent par exemple inhiber, comme la lumière, l'élongation des entrenœuds. Par exemple les pommes de terre ne forment plus de tubercules à des températures nocturnes élevées. Les carottes deviennent coniques et allongées à basses températures et courtes et trapues à températures élevées. Ainsi, les couleurs de certaines fleurs peuvent être modifiées par la température qui agit au cours d'une phase déterminée du développement des boutons florales (Nultsch, 1988 in Côme, 1992).

2.3.2.2- Le gel :

Le gel s'accompagne de la formation des cristaux de glace dans les tissus de la plante, il peut agir directement sur le végétal et produire des nécroses des bourgeons, éclatement des troncs et la mort des feuilles. Il peut avoir deux actions sur les membranes : il modifie l'arrangement de la trame lipidique qui les constitue et provoque la formation de cristaux de glace qui agissent comme petites aiguilles perforatrices.

Ducrey (1981) a étudié l'action des basses températures hivernales sur la photosynthèse du cèdre et du Douglas. Les résultats obtenus montrent que la photosynthèse chez le cèdre est peu influencée par la température jusqu'à -2°C , ensuite elle diminue très rapidement pour s'annuler vraisemblablement vers -8°C . Cependant chez le Douglas, la photosynthèse n'est pas diminuée jusqu'à -6°C , ce qui permet de penser que la température de gel des tissus n'est pas encore atteinte.

2.3.2.2.1-Les mécanismes de défense :**- Phénomène de surfusion:**

La température de l'eau qui se refroidit lentement peut être considérablement inférieure à 0°C (jusqu'à -38°C pour l'eau pure, mais habituellement jusqu'à -5 , -10°C) avant que la glace ne se forme. La température remonte brutalement à 0°C lorsque les premiers cristaux de glace apparaissent. Ce réchauffement, d'une température négative jusqu'à 0°C , est dû à la libération de la chaleur de fusion. Ce phénomène de surfusion est courant chez les plantes (Cornic, 2007).

- Formation de la glace à l'extérieure de la cellule (dans l'apoplasme):

La congélation se fait d'abord dans les vaisseaux du xylème : c'est là que se trouve le plus grand volume d'eau disponible, et la congélation fonction de la présence de particules (germes de congélation) servant de point de départ à la formation des premiers cristaux et du degré de surfusion, apparaîtra d'abord dans un volume d'eau important. C'est là aussi que la concentration en solutés de l'eau est la plus faible et par conséquent là où le point de congélation est le plus élevé (Cornic, 2007). La formation de glace dans le compartiment extracellulaire entraîne une déshydratation du milieu cellulaire dont la concentration en solutés augmente : ce qui diminue son point de congélation. C'est le cas des céréales d'hiver, des choux, de la grande Fétuque, qui peuvent survivre à des températures de -25°C. C'est le cas aussi de beaucoup d'espèces ligneuses (Korner, 1999).

-Les germes de congélation :

Les agents autour desquels l'eau va s'organiser en structures qui ressemblent à des cristaux de glace, et qui sont responsables de sa cristallisation, sont des germes de congélation. Ils peuvent être des poussières, mais être aussi de nature biologique. En particulier, les plantes se trouvant dans une zone polluée et chez lesquelles on trouve quelques microparticules dans les espaces intercellulaires sont plus sensibles au gel (Lundheim, 2002 in Cornic, 2007).

2.3.2.3- L'endurcissement :

L'endurcissement se définit comme l'acquisition de résistance au gel par la plante. Si l'arrivée du froid est progressive (comme souvent dans la nature), les mécanismes de compensation peuvent aboutir à la résistance de certaines plantes aux basses températures (Côme, 1992).

2.3.2.3.1- Changements biochimiques associés à l'endurcissement au froid:**a)- Les hydrates de carbonnes (Sucres) :**

Depuis longtemps, il est connu que le taux des sucres augmente considérablement chez des plantes soumises aux différents types de stress. Les principaux sucres solubles accumulés sous stress sont : le glucose, fructose et le saccharose (Hare *et al.*, 1998).

Bewley (1979) in Grieu *et al.*,(1988) signale que les glucides pourraient assurer une protection des structures membranaires notamment chloroplastiques et mitochondriales. Ainsi, les travaux de Jung et Smith (1961) ont permis de caractériser l'accumulation des hydrates de carbone pendant l'acclimatation au froid de la luzerne et du trèfle rouge. Le pourcentage d'hydrates de carbone totaux non structuraux (HCN) s'accroît pendant l'automne, atteint un maximum entre décembre et février et diminue progressivement jusqu'au printemps.

- L'amidon :

A l'automne, les hydrates de carbone sont principalement composés d'amidon. Cette proportion diminue au fur et à mesure que l'amidon est hydrolysé en saccharose (Jung et Smith, 1961; Bula et Smith, 1954). Les enzymes responsables de cette dégradation sont des endoamylases (Volence *et al.*, 1991). Leur activité augmente lors de l'utilisation de l'amidon (endurcissement, reprise de la croissance et après une coupe) dans les racines de la luzerne (Jung et Larson, 1972).

- Le saccharose:

L'endurcissement au froid s'accompagne d'une accumulation importante de saccharose au niveau du collet chez la luzerne (Duke et Doehlert, 1981). Le saccharose s'accumule tôt à l'automne à températures au-dessus du point de congélation et son niveau continue de s'accroître à des températures sous zéro et cela aussi bien sous des conditions d'acclimations naturelles que contrôlées (Castonguay *et al.*, 1995). Les recherches effectuées par Duke et Doehiert (1981) ont démontré que les cultivars de luzerne tolérants au froid avaient de plus hauts niveaux de saccharose au début de l'automne que les cultivars non tolérants.

Le saccharose réduirait les dommages causés aux membranes lors de la déshydratation de la cellule (Schwab et Heber, 1984). Ce sucre interagirait avec les groupements hydroxyliques des phospholipides membranaires en remplaçant l'eau dans le maintien de la structure de la membrane. Ce phénomène permettrait de prévenir la séparation de phase des doubles parois lipidiques ainsi que la fusion de la membrane plasmique (Crowe et Crowe, 1992). De plus, ce disaccharide interagirait avec les protéines pour maintenir l'activité des enzymes lors de la déshydratation (Crowe *et al.*, 1990).

- Fructans:

Les fructans forment une classe distincte de HCN constituée de polymères linéaires ou réticulés de fructose qui s'accumulent dans les vacuoles. Même si leur fonction principale est de constituer un réservoir d'hydrates de carbone, de nombreuses évidences expérimentales leur attribuent des rôles importants dans la tolérance aux stress hydriques et aux basses températures (Hendry, 1993; Vijn et Smeekns, 1999). Chez les graminées pérennes, les fructans s'accumulent à la base des tiges et dans les couronnes durant l'automne et au début de l'hiver et ils constituent la principale forme de HCN entreposés (Livingston, 1991). Les fructans sont des hydrates de carbone de réserve facilement accessibles pour la plante et il est suggéré que leur dépolymérisation, suite à l'exposition à des températures gélives, est une source importante de sucres cryoprotecteurs (Livingston, 1996).

b)- Métabolisme azoté:

Bien que l'implication du métabolisme azoté dans la tolérance au froid ait été moins documentée que le métabolisme carboné, certains chercheurs ont démontré l'importance du métabolisme azoté, incluant les acides aminés et les protéines, dans l'acclimatation au froid à l'hiver et de la survie des plantes (Volenc *et al.*, 1991).

- La proline :

La proline est un marqueur de la résistance aux contraintes abiotiques (Belkhouja et Bidai, 2007). L'accumulation de cet acide aminé a été démontrée chez de nombreuses espèces et dans différentes situations de stress (hydrique, thermique) (Bellinger *et al.*, 1989; Dorffling et Askman, 1989; Blum et Ebercon, 1976). Chez les plantes sensibles, la présence de cet acide aminé est par contre amoindrie (Chen *et al.*, 1995).

La proline, localisée principalement dans le cytoplasme, agirait comme un cryoprotectant durant l'exposition de la plante à des températures gélives (Delauney et Verma, 1993). L'accumulation de proline durant l'endurcissement au froid a été associée à une augmentation de la tolérance au froid chez plusieurs plantes (Koster et Lynch, 1992 ; Dörffling *et al.*, 1998). Plus récemment, l'utilisation de plantes transgéniques d'*Arabidopsis* capables de surproduire la

proline a permis d'établir l'existence d'un lien entre l'accumulation de la proline et le degré de tolérance au gel de ces espèces (Nanjo *et al.*, 1999).

La proline accumulée pourrait intervenir dans la régulation du pH cytoplasmique (Pesci et Beffagna, 1984) ou constituer une réserve d'azote utilisée par la plante postérieurement à la période du stress (Tal et Rosenthal, 1979). Elle aide dans la stabilisation des protéines membranaires et des protéines libres, ceci suggère qu'elle a un rôle osmoprotecteur, du fait qu'elle est le plus accumulée dans les plastides, les mitochondries et le cytosol, mais non dans les vacuoles ; ceci suggère que les chloroplastes et les mitochondries importent la proline, et la vacuole a une activité exportatrice du moment que la concentration de la proline est faible à son niveau par rapport au cytosol au cours du stress (Bellinger et Larher, 1987).

La proline contribue à stabiliser les structures sous cellulaires (par exemple des membranes et des protéines), les radicaux libres, et le potentiel redox cellulaire dans des conditions de stress et maintenir des rapports appropriés de NADP⁺/NADPH compatibles avec le métabolisme (Hare *et al.*, 1998).

- Autres acides aminés:

En plus de la proline, plusieurs chercheurs ont démontré l'accumulation de certains acides aminés chez les plantes exposées aux températures froides incluant l'alanine chez l'orge (Wallace *et al.*, 1984), la valine, la lysine, l'histidine et la serine chez *Nothofagus dombeyi*, espèce ligneuse originaire du Chili (Meza-Basso *et al.*, 1986).

Chez le blé, Naidu *et al.*, (1991) ont remarqué une augmentation importante de la glutamine, de l'alanine, de l'acide aspartique et de l'asparagine après 5 jours d'acclimatation à 4°C. Une accumulation marquée de glutamine et d'acide glutamique a également été notée par Kaldy et Freyman (1984) durant l'endurcissement au froid de cette même espèce. Le rôle des acides aminés protégeraient les membranes cellulaires, particulièrement les membranes des thylakoïdes, contre les dommages causés par le gel (Singh et Paleg 1985).

- Les protéines :

En plus des acides aminés libres, l'endurcissement au froid induit des changements quantitatifs et qualitatifs importants dans la composition protéique. Une augmentation de la concentration des protéines totales durant l'endurcissement au froid a été remarquée chez plusieurs plantes (Davis et Gilbert, 1970 ; McKenzie *et al.*, 1988). En plus de représenter une réserve azotée assurant la reprise printanière, les protéines pourraient jouer un rôle important dans la tolérance au gel des plantes pérennes.

Un grand nombre de protéines induites par les stress environnementaux ont la caractéristique d'être thermostables et plusieurs d'entre elles ont été identifiées chez les graminées à la suite de l'exposition à des températures froides (Lin et Thomashow, 1992). Le rôle cryoprotecteur de ces protéines proviendrait de la protection contre la déshydratation cellulaire, du maintien du transport des métabolites cellulaires et de la protection de l'intégrité de certaines protéines (Houde *et al.*, 1995).

2.4- Les échanges gazeux foliaires:

La présence de stomates, ensemble de cellules épidermiques spécialisées délimitant un pore ou ostiole mettant en relation le milieu interne d'un organe végétal et l'atmosphère environnante, est une adaptation à la vie terrestre des végétaux supérieurs. La connaissance du comportement et de la physiologie des stomates est une des clés de la compréhension du développement des végétaux, car c'est leur ouverture qui permet de réguler l'entrée de CO₂ ainsi que la perte d'eau par la plante (Jarvis et Davis, 1998 in Coll, 2000).

2.4.1- Mécanisme d'ouverture des stomates :

Un stomate s'ouvre quand ses cellules de garde sont turgescentes, résultat d'un influx d'eau à partir des cellules épidermiques voisines. Cet influx est permis par une baisse de potentiel hydrique dans les cellules de garde, dû à une accumulation d'ions (K⁺, Cl⁻, malate) (Fig.8). À l'inverse, quand ces cellules déchargent des ions vers les cellules épidermiques, il y a un efflux d'eau. La turgescence des cellules de garde diminue, ce qui entraîne la fermeture du stomate (Meyer *et al.*, 2004).

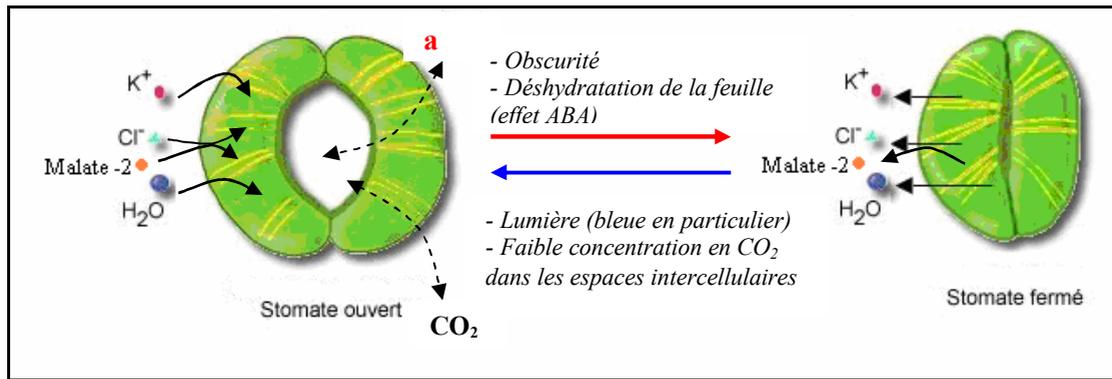


Fig.8 : Facteurs d'ouverture et de fermeture des stomates (d'après Meyer *et al.*, 2004).

L'ouverture des stomates est un mécanisme actif au cours duquel la concentration des cations potassium augmente, ainsi que celle des anions (chlorure et acides organiques). Cet influx de potassium est lié à l'activité d'une ATPase membranaire. La lumière (lumière bleue en particulier) est le facteur essentiel de l'ouverture des stomates. La fermeture des stomates est déclenchée par une augmentation du taux de CO_2 dans la chambre sous-stomatique. Une élévation de la température, un stress hydrique favorisent aussi la fermeture. Il a été démontré que la déficience en certaines hormones végétales comme l'acide abscissique entraîne l'impossibilité de la fermeture des stomates et le flétrissement des plantes (Meyer *et al.*, 2004).

2.4.2- Influence des facteurs internes et externes sur le fonctionnement des stomates:

2.4.2.1- Facteurs internes:

Les stomates sont très sensibles à l'état d'hydratation de la feuille. Ils se ferment si la turgescence foliaire est inférieure à un seuil critique, qui varie selon les espèces. Les mouvements des stomates sont sous le contrôle de l'acide abscissique (ABA), une phytohormone de stress, synthétisée dans toutes les cellules adultes chlorophylliennes et distribuée dans le végétal par le xylème et le phloème. Les mouvements des stomates semblent aussi répondre à des rythmes endogènes circadiens (jour/nuit) (Meyer *et al.*, 2004).

2.4.2.2- Facteurs externes:

- La lumière :

Chez la plupart des plantes, la lumière entraîne l'ouverture des stomates et donc l'augmentation de la transpiration. Toutefois, la sensibilité des plantes varie largement selon

l'espèce. L'action de la lumière ne s'exerce pas sur l'évaporation de l'eau cellulaire mais sur le métabolisme des cellules stomatiques. Elle stimule l'activité de leurs ATPases membranaires fonctionnant comme des pompes d'échange K^+/H^+ . Le K^+ s'accumule dans les vacuoles et il en résulte une entrée d'eau dans les cellules de garde et donc une augmentation de la pression de turgescence qui ouvre les stomates (Meyer *et al.*, 2004).

- La température :

Selon Heller *et al.*, (1989), la température agissant également sur l'évaporation de l'eau cellulaire, son augmentation entraîne une augmentation de l'ouverture des stomates et donc une augmentation de la transpiration. Au delà de 25 à 30°C, mis à part quelques exceptions (Pélagonium), elle provoque la fermeture des stomates. Ainsi, si la chaleur et la sécheresse sont plus marquées, on voit apparaître une dépression de midi, fermeture passagère des stomates aux heures les plus chaudes de la journée, chez la plupart des espèces.

Dans ces conditions de hautes températures, le potentiel de survie des jeunes semis passerait par leur aptitude à réguler efficacement la température de leurs feuilles de façon à maintenir l'appareil photosynthétique en dessous de sa température critique (température à partir de laquelle le photosystème II est altéré irréversiblement). La régulation de la température foliaire s'effectue par le biais de la transpiration qui permet d'éliminer via la vaporisation de l'eau l'excédent d'énergie emmagasinée. L'aptitude des semis à maintenir une forte transpiration sous de fortes températures passerait par leur capacité à maintenir leurs stomates ouverts sous de telles conditions (Chamaillard, 2007).

- L'état hydrique du sol :

Selon Cornic (1994) in Coll (2000), la fermeture stomatique est le principal facteur impliqué dans la réduction d'assimilation nette de CO_2 pour les arbres en périodes de sécheresse. Dans ces conditions de stress, l'arbre est susceptible de réguler son fonctionnement hydrique en fermant les stomates des feuilles, donc en limitant son évapotranspiration et, par conséquent, le prélèvement d'eau dans le sol. La fermeture des stomates a pour effet secondaire d'interrompre la circulation de gaz carbonique et donc de stopper la photosynthèse, la croissance de l'arbre et sa capacité à accumuler des réserves (Bréda et Dreyer, 2003).

- L'assèchement de l'air :

La transpiration est stimulée par un assèchement de l'air entourant la feuille, jusqu'à une certaine limite, au delà de la quelle les stomates se ferment. L'assèchement peut être provoqué par le vent qui remplace l'air humide par de l'air sec en surface de la feuille, tout en amincissant la couche d'air limite (Meyer *et al.*, 2004).

Partie 2

Présentation de la zone d'étude

&

Matériels et méthodes

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude :

1.1- Localisation et caractérisation physique de la région d'étude :

- Situation géographique :

La Wilaya de Sétif se situe au Sud-Est par rapport à la capitale du pays, avec une superficie de 6504 Km², soit 0,27 % du territoire national. Son altitude moyenne est de 1080 mètres. Elle est limitée au nord par la Wilaya de Béjaïa et Jijel, au Sud par la Wilaya de Batna et M'sila, à l'Est et à l'Ouest respectivement par la Wilaya de Mila et Bordj Bou-Arredj.

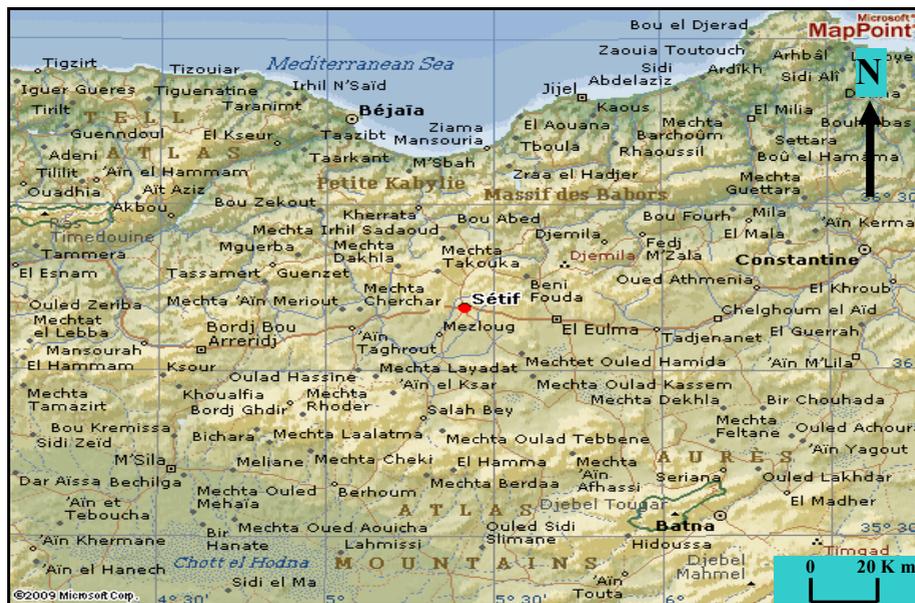


Fig.9: Localisation géographique de la région d'étude (Sétif)

- Topographie et pédologie:

Le relief est assez accidenté, de pente moyenne à forte (10 à 20%). La wilaya de Sétif est appelée capitale des hauts plateaux avec un découpage naturel décomposé de 3 grandes zones :

- **Une zone montagneuse au Nord:** représentée par la chaîne des Babors qui s'étend sur une centaine de kilomètres couvrant pratiquement le Nord de la wilaya où on rencontre des cimes élevés dont djebel Babor avec 2004 m.

- **Une zone des hautes plaines :** Elle occupe la région centrale de la wilaya dont l'altitude varie entre 800 et 1300 mètres.

- **Une lisière au Sud** : renfermant des cuvettes où dorment les chotts: Chott El Beida près de Hammam Sokhna, Chott El Frein près de Ain Lahdjar, Chott El Melloul près de Guellal.

Sur le plan pédologique, la région montagneuse et les hautes plaines sont couvertes par des sols calcaires, alors que la lisière Sud et Sud-Est sont couvertes de sols salins.

- Hydrologie :

Conséquence des données climatiques et des précipitations, les cours d'eau ont des écoulements irréguliers. Les principaux Oueds sont: Oued Boussalem, Oued El Kébir. L'oued de Boussalam maintient des écoulements en été et traverse plusieurs Daïras pour rejoindre l'Oued Soummam dans la Wilaya de Bejaia.

1.2- Caractérisation climatique de la région d'étude :

Les données climatiques prises en compte sont obtenues à partir des données de la station météorologique de Sétif pour une période s'étalant de 1998 à 2007, unique station qui peut fournir des données complètes par rapport à d'autres stations météorologiques plus ou moins proches de la zone d'étude qui possèdent des données incomplètes ou manquantes.

1.2.1- Les précipitations :

Pour la grande partie du monde, les précipitations représentent la source principale d'eau pour la production agricole. Elles sont caractérisées par trois principaux paramètres : leur volume, leur intensité, les mois et aussi les années (Ramade, 1994).

Tab.2 : Précipitations mensuelles moyennes enregistrées à la station de Sétif pendant la période (1998-2007)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Totale	Moyenne
P (mm)	44,11	25,46	28,94	41,55	44,55	21,57	12,41	14,64	50,24	29,41	39,38	53,15	405,41	33,78

D'après l'analyse des données recueillies aux prés du service météorologique de Sétif la région reçoit environ 405.41mm de pluie annuellement et une moyenne mensuelle de 33.78mm (Tab.2).

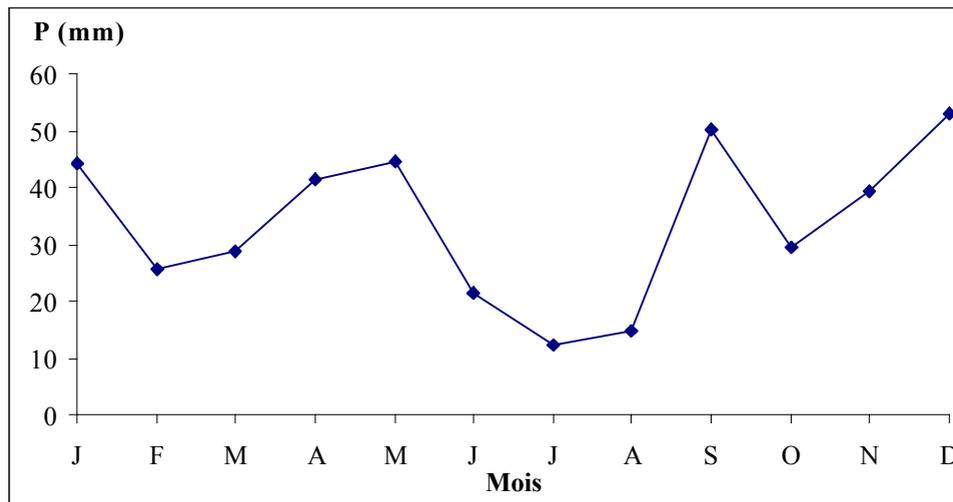


Fig.10 : Variation mensuelle de la pluviométrie de la région de Sétif (Période 1998-2007)

La répartition des pluies d'une saison à l'autre est marquée par sa très grande irrégularité comme la figure 10 l'indique. Le maximum des précipitations est enregistré pendant le mois de décembre est de 53.15mm, par contre le minimum est enregistré pendant le mois de Juillet de 12.41mm. Ainsi près de 59.63 % des précipitations tombent en Hiver et en Automne. Donc la période sèche s'étend du mois de la mi-Mai à Septembre, celle humide est comprise entre le mois d'Octobre et le mois de Mai (Fig.10).

Pour la pluviométrie annuelle de la période (1998-2007) la première remarque qui s'impose c'est la grande variabilité interannuelle des précipitations ainsi que la succession très irrégulière de années pluvieuses.

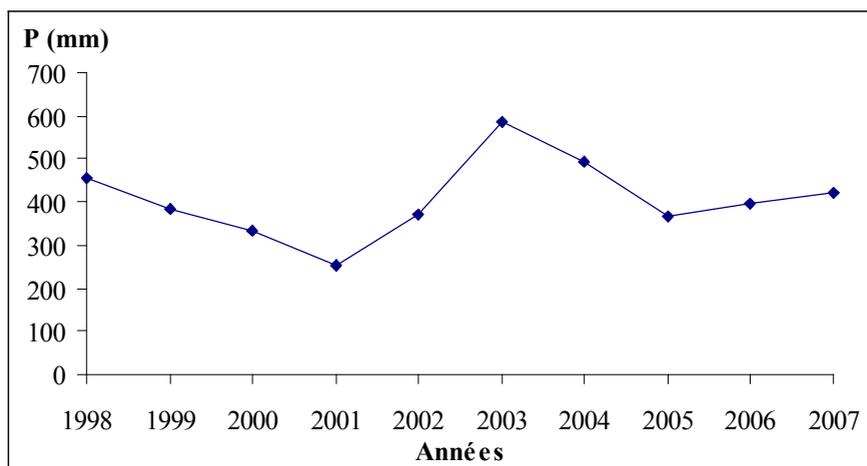


Fig.11: Variation interannuelle de la pluviométrie (période 1998-2007)

La figure11 montre que l'année 2003 a été caractérisée par une forte pluviosité avec plus de 580 mm. Ainsi, la région n'a reçu que 251.7 mm durant l'année 2001.

- Régime saisonnier :

Pour le végétal, l'eau utile est celle disponible durant son cycle de développement, autrement dit la répartition des pluies est plus importante que la quantité annuelle des précipitations (Djebaili, 1984).

Tab.3 : Régime saisonnier de la région de Sétif (1998-2007)

Saison	Mois	P(mm)	Précipitations saisonnières	Précipitations saisonnières en (%)	Régime saisonnier
Hiver	Décembre	53,15	122,72	30,27	H
	Janvier	44,11			
	Février	25,46			
Printemps	Mars	28,94	115,04	28,38	P
	Avril	41,55			
	Mai	44,55			
Eté	Juin	21,57	48,62	11,99	E
	Juillet	12,41			
	Août	14,64			
Automne	Septembre	50,24	119,03	29,36	A
	Octobre	29,41			
	Novembre	39,38			
	Total	405,41	405,41	100	-

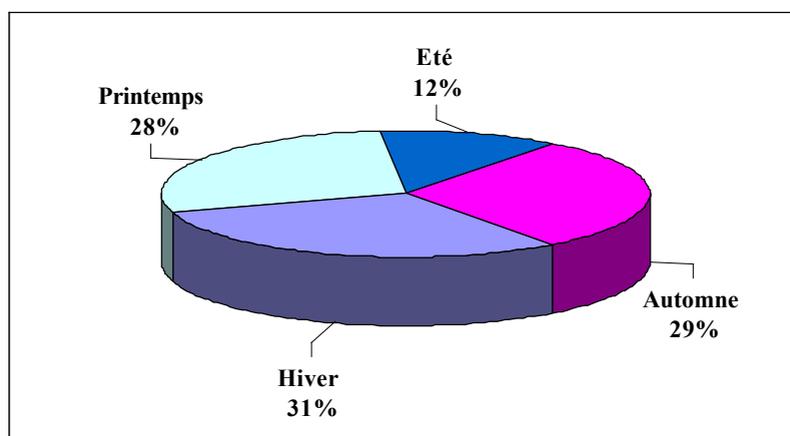


Fig.12: Répartition saisonnières des précipitations

La figure12 qui indique les précipitations saisonnières, montre que globalement les saisons hivernales (H) et automnales (A) sont les plus arrosées (60 % par rapport aux précipitations annuelles).

Selon Daget (1977), un climat est méditerranéen si la somme estivale des précipitations est la plus faible des quatre valeurs saisonnières, donc c'est le cas de notre région d'étude, puisque le graphique révèle que la station de Sétif figure dans le régime saisonnier de type HAPE, où l'été est la saison la moins arrosée, alors que l'hiver et

l'automne sont les saisons les plus pluvieuses de l'année, ceci montre le caractère méditerranéen du climat de la région.

1.2.2- La température :

Comme le facteur pluviométrie, les températures exercent une influence importante sur la répartition des espèces et sur leur croissance. Les espèces sont sensibles aux températures minimales de la saison froide et aux températures maximales de la saison chaude et donc à l'amplitude des variations thermiques.

Tab.4 : Températures mensuelles minimales (m), maximales (M), moyennes (M+m/2) et amplitudes thermiques (M-m) de la région de Sétif (Période 1998-2007)

T (en °C) Mois	M	m	M+m/2	M-m
Janvier	9,82	2,07	5,95	7.75
Février	10,95	2,52	6,74	8.43
Mars	15,34	5,34	10,34	10
Avril	18,19	8,29	13,24	9.9
Mai	23,86	12,80	18,33	11.06
Juin	30,34	17,78	24,06	12.56
Juillet	33,91	20,87	27,39	13.04
Août	32,94	20,55	26,75	12.39
Septembre	26,98	16,10	21,54	10.88
Octobre	22,30	12,82	17,56	9.48
Novembre	14,15	6,18	10,17	7.97
Décembre	10,01	2,94	6,48	7.07
Moyenne	20,73	10,69	15,71	10.04

A) - Températures moyennes mensuelles :

Nous remarquons que pour l'ensemble des données, le mois de janvier est le mois le plus froid (moyenne de 5.95°C). Ce moyenne correspond aux températures favorables au développement du Pin d'Alep tels que décrit par Kadik (1983) (entre 3.6 et 7.7°C).

Il ressort aussi que la température moyenne mensuelle inférieure à la température moyenne annuelle est de 6 mois (Novembre à Avril). Ceci divise l'année en deux saisons distinctes : une saison froide et une saison chaude (caractéristiques du climat méditerranéen) :

- Une saison froide (6 mois) s'étalant de Novembre jusqu'à Avril.
- Une saison chaude (6 mois) qui s'étale du mois de Mai au mois de Octobre.

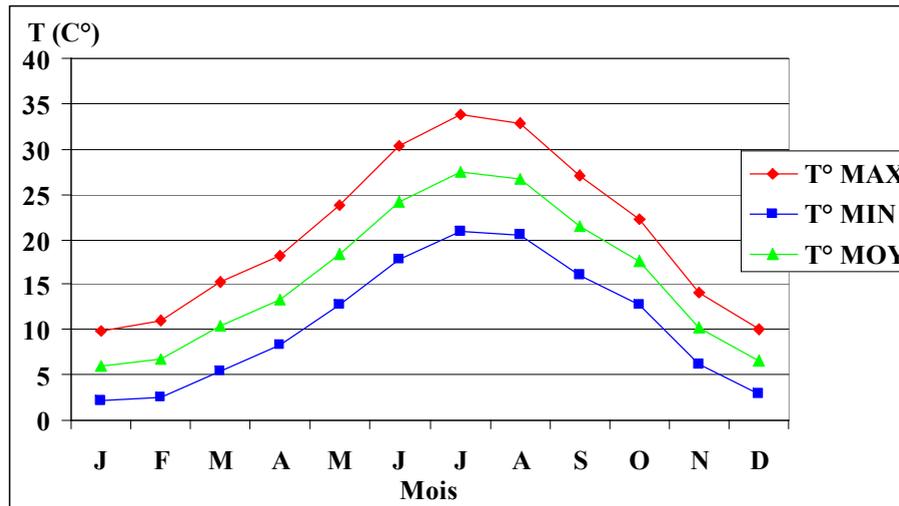


Fig.13: Evolution des températures durant l'année (Période 1998-2007)

B)- Températures maximales:

En écologie, la connaissance de la valeur des températures extrêmes permet de classer les espèces en fonction de leur comportement vis-à-vis d'elles (Djellouli et Djebaili, 1981), une tolérance des espèces à la moyennes des maxima « M » leur permet en outre de résister aux hautes températures, donc à la longue durée de sécheresse caractéristique du climat méditerranéen. Le pin d'Alep marque son optimum de développement entre les températures maximales moyennes de 32°C à 33°C (Kadik, 1987). Pour notre région, les maxima sont observés au mois de juillet, avec une valeur de 33.91°C.

C)- Températures minimales:

Ces températures définissent la durée des gelées qui conditionnent les stades phénologiques, les phases de développement des espèces et le démarrage de la période de végétation. Le pin d'Alep trouve un optimum de développement dans les zones où la valeur de « m » va de 3.6°C à 7.7°C (Kadik, 1987). Dans notre cas, nous remarquons que le minimum de température est enregistré au mois de Janvier avec 2.07°C.

D)- Température moyenne annuelle :

Le pin d'Alep se développe dans les limites des températures moyennes annuelles de 13°C et 18.35°C (Kadik, 1987). L'examen du tableau 4 montre que la région se caractérise par une température (moyenne annuelle : 15.71°C) avec de fortes variations saisonnières

(27.39°C en juillet et 5.95°C en janvier). Notre région d'étude correspond alors aux zones de productions importantes qui sont situées dans l'intervalle (13°C-18.35°C).

E)- L'amplitude thermique :

La figure 14 montre que pour la station de Sétif, les amplitudes thermiques sont importantes en été où elles varient de 12 à 13 °C alors en hiver elles présentent des valeurs de 7 à 8 °C.

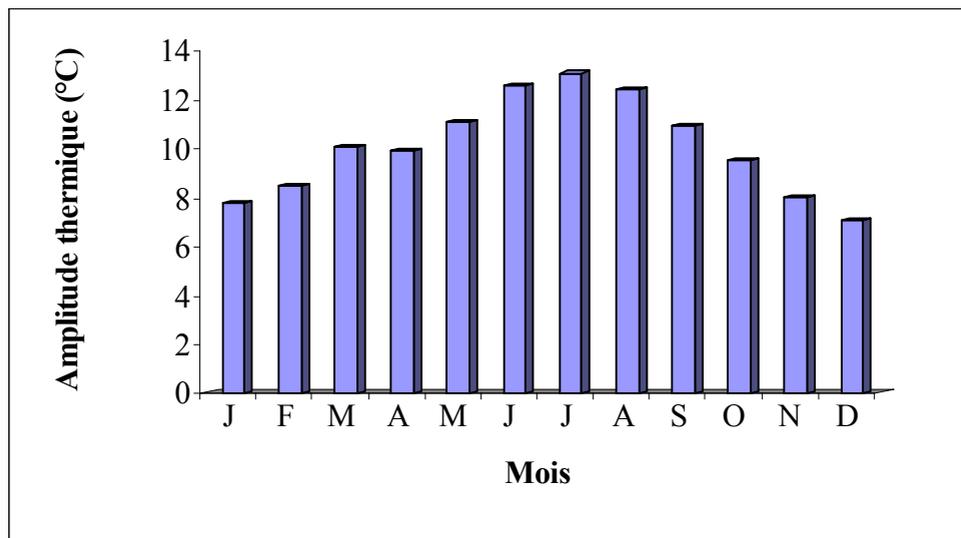


Fig.14: Amplitude thermique de la région de Sétif (période 1998-2007)

1.2.3- Synthèse bioclimatique :

Tous les éléments du climat agissent en même temps pour former un milieu climatique. Pour estimer rapidement l'influence des principaux éléments, divers systèmes sont proposés. Les plus utilisés en région méditerranéenne sont : Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen et le climagramme pluviométrique d'Emberger. Ces deux systèmes résument le bioclimat d'une station donnée par trois éléments fondamentaux du climat: précipitations (mm) - températures maximales et minimales (°C).

1.2.3.1- Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen :

Bagnouls et Gaussen (1957) considèrent qu'un mois est sec quant le total des précipitations exprimées en mm est égale ou inférieur au double de la température exprimée en degrés Celsius ($P \leq 2T$).

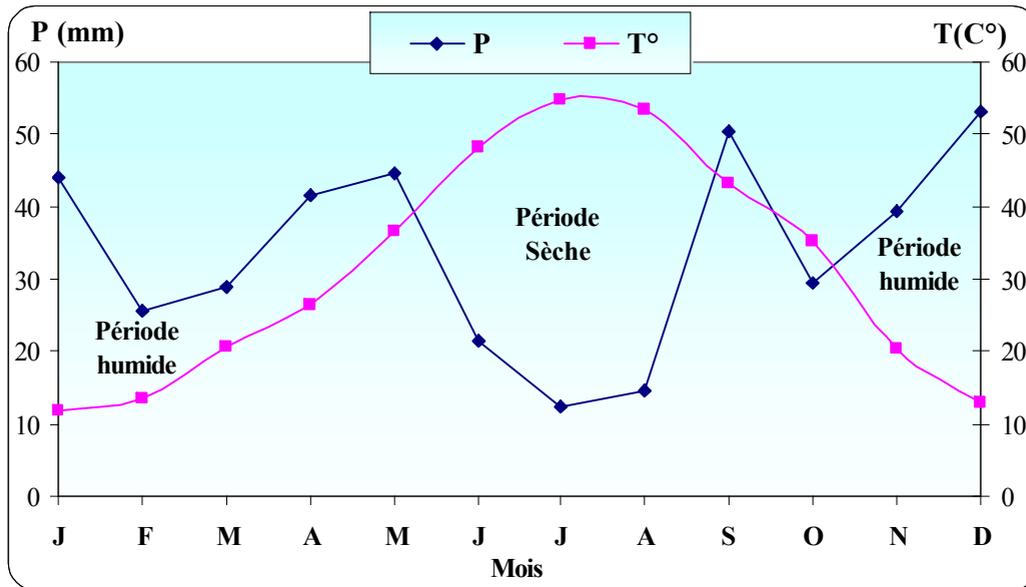


Fig.15: Diagrammes Ombrothermiques de la région d'étude (1998-2007)

L'indice xérothermique de Bagnouls et Gaussens, montre qu'à Sétif, la période sèche s'étale de la mi-Mai à Septembre avec une forte sécheresse durant les mois de Juillet et Août (Fig.15). Les mois situés en dehors de cette période constituent la période humide ($P > 2T$).

1.2.3.2- Quotient pluviothermique d'Emberger :

Le calcul du quotient pluviothermique Q_2 d'Emberger est nécessaire pour déterminer l'étage bioclimatique d'une station. Notons d'abord que ce quotient, mis au point par Emberger (1955) et amélioré par Daget en 1977, n'est applicable qu'aux climats de type méditerranéen.

Le (Q_2) est déterminé par la combinaison des 3 principaux facteurs du climat.

P : Pluviométrie annuelle en mm ;

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en degrés kelvin ;

m : moyenne des minima du mois le plus froid en degrés kelvin.

Il est donné par la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{1000 \times P}{\left(\frac{M + m}{2}\right) \times (M - m)} = \frac{2000 \times P}{M^2 - m^2}$$

L'application de la formule nous donne les valeurs suivantes :

Tab.5 : Quotient pluviométrique d'Emberger de la région de Sétif (1998-2007)

Pluviométrie annuelle en (mm)	Températures				Q2	Etage bioclimatique
	Mois le plus chaud	M (°C)	Mois le plus froid	m (°C)		
405,41	Juillet	33.91	Janvier	2.07	43.73	Semi aride à hiver frais

Les étages bioclimatiques sont reconnus par référence à un climagramme comportant un réseau de lignes séparatrices dans un espace orthonormé par la moyenne des minima du mois le plus froid (m).

Après avoir reporté la valeur du Q2 qui est égale à 43.73 sur le climagramme, nous remarquons que la région de Sétif appartient à l'étage bioclimatique semi aride à hiver frais.

1.2.3.2.1- Situation de la pinède de la région de Sétif dans le climagramme d'Emberger :

Pour situer les deux stations : Righa Dahra (Commune de Ain Oulemene) et Choug Aissa (Commune de Djemila) dans le climagramme d'Emberger, nous avons procédé à des extrapolations des valeurs de pluviométries et de températures relevées dans la station de référence (Sétif), notons que cette dernière est située à 1033mètres d'altitudes. Ces extrapolations sont effectuées suivant un gradient altitudinal de 100m de dénivelé, calculé sur la base de -0.7°C pour les maxima (M) et de -0.4°C pour les minima (m). En ce qui concerne la pluviosité, le gradient pluviométrique croit de 40mm tous les 100 mètres d'altitude.

Tab.6 : Evaluation du Q2 en fonction de l'altitude

Altitude (m)	P (mm)	m (°C)	M (°C)	Q2	Etages bioclimatiques
1100	432,21	1,802	33,441	46,97	Semi-aride à hiver frais
1200	472,21	1,402	32,741	51,91	
1300	512,21	1,002	32,041	56,96	Sub-humide à hiver frais
1462 (Choug Aissa)	577,01	0,354	30,907	65,39	
1500	592,21	0,202	30,641	67,41	
1600	632,21	-0,198	29,941	72,82	Sub-humide à hiver froid
1700	672,21	-0,598	29,241	78,35	
1785 (Righa Dahra)	706,21	-0,938	28,646	83,16	
1800	712,21	-0,998	28,541	84,02	

Contrairement au diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen, ce climagramme permet de comparer rapidement toutes les stations. Son inconvénient est le manque de détail pour chaque station, car les précipitations, les maxima et les minima ne sont pas apparents. Ce quotient facile à interpréter : plus les valeurs du Q2 sont grandes et plus les stations sont humides. Sur cette base, nous avons donc évalué les différents quotients Q2 pour des altitudes allant de 1100m à 1800m et déterminé théoriquement les limites bioclimatiques et thermiques des pinèdes.

Les facteurs orographiques entraînent une certaine diversité de climats locaux. Les données montrent que les pinèdes évoluent dans une tranche altitudinale allant de 1000m jusqu'à plus de 1800m et reçoivent plus de 700mm d'eau par an. Le climat subhumide à hiver froid correspond aux zones d'altitude égale ou supérieure à 1600 m avec des précipitations comprises entre 632 et 712mm par an (Q2 compris entre 72.82 et 84.02). Cependant c'est entre 350 et 700mm d'eau par an que le pin d'Alep présente son développement optimal (Quezel, 1986).

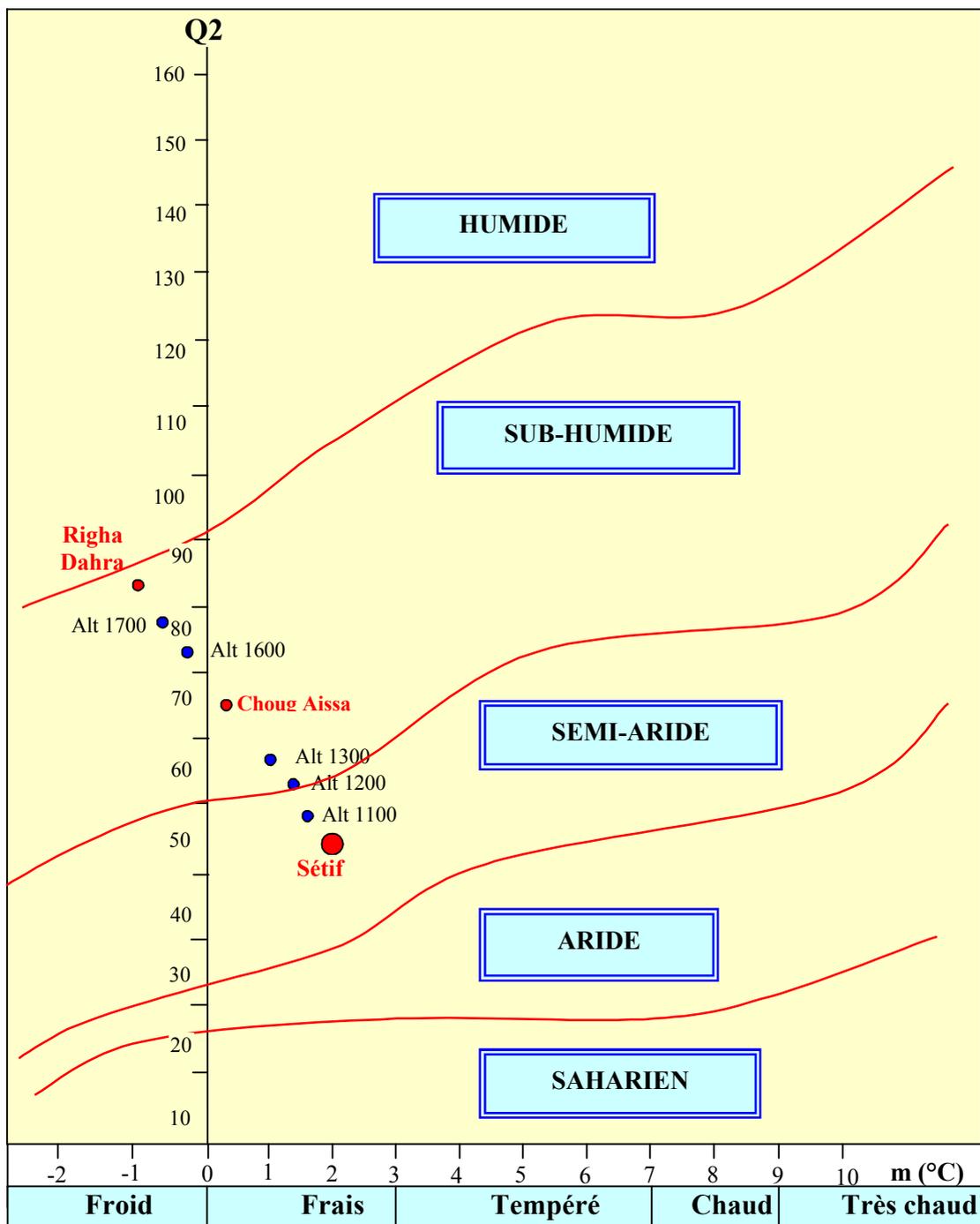


Fig.16 : Climagramme d'Emberger pour la zone de Sétif

Le climagramme d'Emberger établi (Fig.16) montre en effet que la majeure partie de la pinède se situe dans l'étage sub-humide à hiver frais et froid. Le station de Choug Aissa appartient au bioclimat sub-humide ($Q_2=65.39$) et à la variante frais de celui-ci ($m=0.35^\circ\text{C}$), alors que la station de Righa Dahra s'intègre dans une ambiance plus froide ($m=-0.94^\circ\text{C}$) (bioclimat sub-humide à hiver froid).

Ces observations rejoignent celles faites par Quezel (1986) précisant que le groupe halepensis se développe non seulement dans les étages thermo et méso-méditerranéen à des altitudes qui varient de 0 à 1400m mais occupe aussi l'étage supra-méditerranéen à plus de 2000m d'altitude dans le cas de Aurès.

Selon Kadik (1987), les facteurs climatiques principaux régissant l'extension du pin d'Alep en Algérie sont la pluviométrie, la sécheresse estivale et la moyenne de minimums des mois les plus froids. Pour les deux stations (Choug Aissa et Righa Dahra), les minimums du mois le plus froid (m) peuvent atteindre -0.94°C ; alors que les meilleures pineraies correspondent aux valeurs de m comprises entre -1.8°C et 5°C (Kadik, 1987).

1.2.3.2.2- Variation annuelle du Q2 durant la période de 1998-2007:

Durant cette dernière décennie la température minimale du mois le plus froid est enregistré durant le mois de décembre, janvier, février et mars avec une variation de -0.2 à 5.8°C , alors que la température maximale du mois le plus chaud est enregistrée dans le mois de juillet et août avec des valeurs allant de 32.7 jusqu'à 35.5°C .

Tab.7 : Variation annuelle du Q2 sur une période de 10 ans (1998-2007) dans la région de Sétif

Années	Pluviométrie annuelle (mm)	M ($^\circ\text{C}$)	Mois le plus chaud	m ($^\circ\text{C}$)	Mois le plus froid	Q2
1998	455,9	34,1	Juillet	1,9	Décembre	48.62
1999	384	35,4	Août	0,4	Février	37.69
2000	331,3	33,9	Juillet	-0,2	Janvier	33.50
2001	251,7	34,6	Juillet	1,7	Décembre	26.26
2002	371,5	32,7	Juillet	5,8	Janvier	47.22
2003	584,1	35,5	Juillet	0,7	Février	57.62
2004	492,6	34,2	Août	1,9	Janvier	52.36
2005	368,8	35,1	Juillet	-0,7	Janvier	35.47
2006	394,5	33,4	Juillet	0,5	Mars	41.33
2007	419,7	33,7	Juillet	2	Décembre	45.49
Moy	405.41	34.26	/	1.40	/	42.56

La première remarque qui s'impose c'est la variabilité interannuelle de Q2 durant cette dernière décennie (1998-2007). Pour la période 1998-2001, la figure 17 montre que le Q2 diminue progressivement où il atteint une valeur de 26.26 durant l'année 2001. A partir de 2001, une nette reprise de Q2 qui atteint une valeur de 57.62 pendant l'année 2003 et reçoit une importante quantité de précipitation (584.1mm).

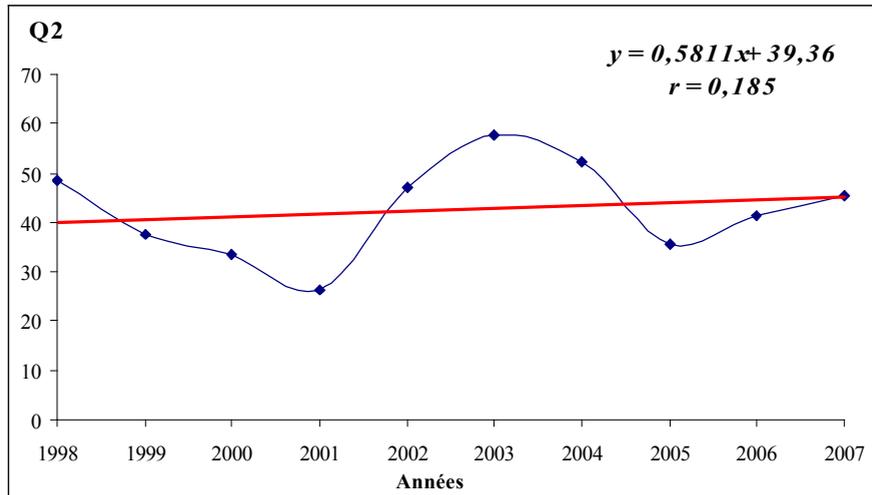


Fig.17: Variation du Q2 durant la décennie 1998-2007

1.2.3.3- Autres indices climatiques :

D'autres indices empiriques aussi importants que ceux évoqués sont calculés et retenus dans le cadre de cette étude. Parmi ces indices on cite :

- L'indice de xéricité ou indice de sécheresse estivale (ISE):

Appelé aussi indice d'Emberger – Giacobbe, il est déterminé par la relation :

$$ISE = \frac{PE}{M}$$

Cet indice caractérise le degré de sécheresse de l'été par le rapport de la pluviométrie estivale en mm (PE) à la moyenne des maxima (M) des températures de l'été.

Tab.8 : Indice de Xéricité (ISE)

Région de	PE	M	ISE
Sétif	48.62	32.39	1.50

En région méditerranéenne, un été est considéré comme sec lorsque le quotient de sécheresse estivale est égal ou inférieur à 5. La faible valeur de ISE confirme la rareté des pluies ainsi que l'étendue de la saison sèche.

Selon Kadik (1987), la meilleure croissance et la meilleure production de pin d'Alep s'accordent avec un indice variant entre 0,90 et 1,50.

- L'indice d'aridité de De Martonne (Im) :

De Martonne a proposé la classification des climats en fonction des valeurs de l'indice d'aridité qui sont données dans le tableau 9 (Guyot, 1999).

Tab.9 : Valeurs de l'indice d'aridité (Guyot, 1999)

<i>Valeur de l'indice</i>	<i>Type de climat</i>
0 < Im < 5	<i>Hyper-aride</i>
5 < Im < 10	<i>Aride</i>
10 < Im < 20	<i>Semi-aride</i>
20 < Im < 30	<i>Sub-humide</i>
30 < Im < 55	<i>Humide</i>

Cet indice permet de préciser le degré de sécheresse de la région, il est calculé en fonction de la température et des précipitations :

$$Im = \frac{P}{T + 10}$$

Im : Indice d'aridité de De Martonne

P : Précipitations moyennes annuelles (en mm)

T : Températures moyennes annuelles (en °C)

Tab.10 : L'indice d'aridité de De Martonne de la région de Sétif

Précipitations annuelles (mm)	Températures moyennes annuelles (°C)	Indice d'aridité	Type de climat
405,41	15,71	<i>15,77</i>	<i>Semi-aride</i>

L'indice I calculé est égale à **15.77** cet indice est d'autant plus faible que le climat est plus aride.

1.2.4- Autres facteurs climatiques :

- L'humidité de l'air :

Tab.11 : Moyenne mensuelle de l'humidité de l'aire durant la période (1998-2007)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
Hum %	77,88	73	63,63	63,62	59,125	44,5	39,37	44,63	59,37	64,12	75,87	80,75	62,16

L'humidité relative constitue par ses écarts brutaux, l'un des caractères climatiques les plus importants des montagnes de l'Afrique du Nord (Quezel, 1980). Elle a une grande importance pour la végétation forestière, elle réduit l'évaporation de l'eau du sol et l'intensité de la transpiration des végétaux ; donc elle permet la conservation de l'eau dans le sol et son utilisation par la plante. Pour notre région, l'humidité moyenne annuelle est de 62.16% (Tab.11).

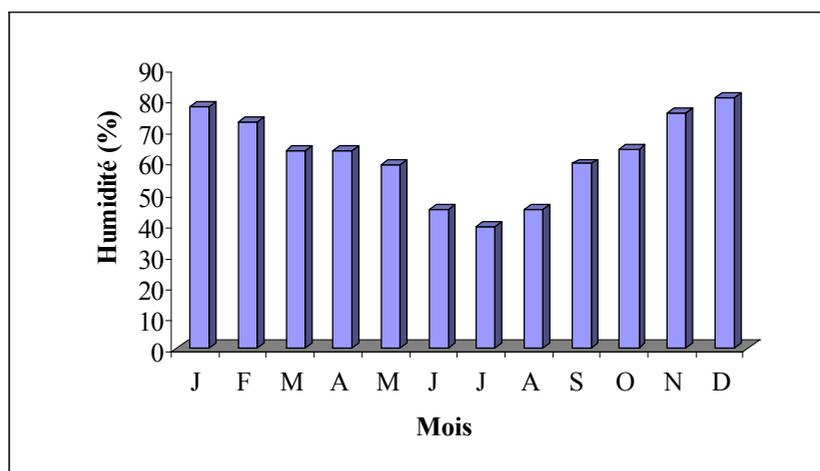


Fig.18: Moyenne mensuelle de l'humidité de l'aire durant la période (1998-2007)

- Le vent :

Le vent constitue en certaines conditions un facteur écologique limitant, par sa fréquence, sa température, son degré hygrométrique. Il est très néfaste pour les plantes (forte évapotranspiration), en effet, dans certaines zones, d'une intensité telle qu'il perturbe, voire empêche, la croissance des arbres (Ramade, 2003).

Tab.12 : Vitesse mensuelle du vent (Station de Sétif 1998-2007)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
Vent m/s	2,64	2,96	3,05	3,45	3,05	3,13	3,02	3	2,73	2,58	2,81	2,75	2,93

La région d'étude est soumise à des vents dominants de direction Nord-Ouest et Sud-Ouest avec une vitesse moyenne de 2.93m/s annuellement. Ces derniers qu'on appelle Sirocco sont chauds et secs et sont qualifiés selon Zitouni (1991), de vents accidentels. Ses effets se font sentir pendant la période estivale où il accentue l'aridité.

- Nombre des jours de gelées et des jours chauds :

La fréquence des températures maximales supérieures à 34°C montre une forte variabilité au cours des années (Fig.19). L'été 2004 demeure extrêmement chaud pour la région de Sétif avec 36 journées chaudes où la température est supérieure à 34°C (Annexe 1, Tab.3). Pour l'année 2002 on observe seulement 23 journées chaudes ($T. \text{maxi} \geq 34^\circ$), chiffre particulièrement bas et inférieur à la moyenne qui est égale à 30 journées chaudes.

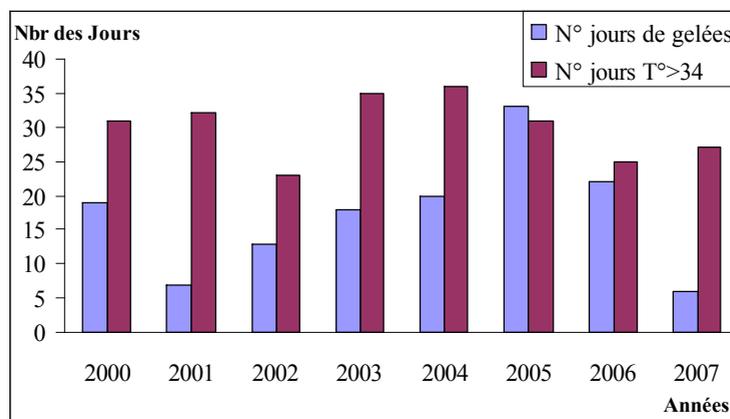


Fig.19: Nombre des jours de gelées et des jours chauds de la période (2000-2007)

D'après la figure 19, on constate une forte variation des jours de gelées, allant de 6 journées pendant 2007 à 33 jours de gelées en 2005 (Annexe 1, Tab.3). Durant l'année 2001, on a enregistré seulement 7 jours de gelées où les températures descendent au dessous de 0°C, nombre inférieur à la moyenne (17 jours de gelées/an). La baisse du nombre de jours de gel est un signe du réchauffement climatique. Avec 27 jours chauds relevés dans l'année 2007, l'occurrence de gel ne s'observe que durant 06 jours.

1.3- Conclusion :

D'après les résultats obtenus, on remarque une grande variabilité interannuelle et inter-saisonnière des précipitations. La région de Sétif reçoit environ 405.41mm de pluie annuellement. Le maximum est enregistré pendant le mois de décembre, par contre le minimum est enregistré pendant le mois de Juillet. Les précipitations estivales, qui représentent 11.99% de la pluviosité annuelle, sont d'une importance capitale pour la survie des jeunes semis.

L'étude climatique nous a permis de conclure que la région de Sétif est caractérisée par un climat semi-aride à hiver frais. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 15.71°C, les minima hivernaux peuvent descendre au-dessous de 2°C, alors que les maxima atteignent ou dépassent 33°C. Les températures minimales de l'hiver puissent par fois constituer un facteur limitant pour la végétation, celle-ci est en règle générale et comme partout en région méditerranéenne, essentiellement conditionnée par la pluviométrie annuelle et surtout par la durée et l'intensité de la saison sèche.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes :

Ce chapitre a pour but de présenter les expériences réalisées sur les semis du pin d'Alep élevés en conditions semi contrôlées (laboratoire) et en conditions naturelles au cours de l'année 2007- 2008. Un des objectifs de ce travail est de déterminer l'éventail thermique du pin d'Alep et sa réaction écophysiological vis-à-vis au stress thermique par la quantification de marqueurs biochimiques.

2.1- Matériel végétal:

Les plantes utilisées pour cette étude sont des semis de pin d'Alep (*Pinus halpensis*) âgés d'une année fournie par la pépinière El-Hayet de Ras Elma située à 17 Km au Sud Ouest de la ville de Sétif. Les plantes sont repiquées dans des pots à base de sol issu de cette pépinière.

2.2- Méthodes d'étude :**2.2.1- Dispositifs expérimentaux :**

Deux types d'expérimentations complémentaires ont été menés, dans une chambre de culture (conditions semi-contrôlées) et en conditions naturelles dans la région de Sétif.

2.2.1.1- Expérimentation en milieu contrôlé (chambre de culture) :

Au laboratoire, les plants sont placés dans des pots en plastiques à raison de trois semis par pot dans une chambre de culture à conditions semi contrôlées sous un éclairage de 6000 lux (produit par des tubes néon PHILIPS TL 40 W/55), une température de $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, et 80% d'humidité relative et une photopériode de 16 heures (photo1). Les plants sont arrosés régulièrement une fois par semaine.



Photo 1 : Semis de pin d'Alep dans une chambre de culture à conditions semi contrôlées

2.2.1.2- Expérimentation en milieu naturel :

En milieu naturel, les plants sont placés dans des sachets polyéthylènes, exposés aux conditions naturelles dans la région de Sétif. Ils sont arrosés régulièrement une fois par semaine. Un désherbage manuel et continu dans le temps a été effectué.



Photo 2 : Semis de pin d'Alep après 9 mois de culture en milieu naturel (dans la région de Sétif)

2.2.2- Traitements thermiques appliqués :

Après l'étude bioclimatique de la région de Sétif, on a sélectionné la gamme des températures suivantes : 38°C,40°C,42°C et 44°C pour les hautes températures et +2°C,-2°C, -6°C et -10°C pour les basses températures. Les semis sont transférés à ces températures pendant une durée de 3 heures. Après chaque stress, l'analyse biochimique est réalisée au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep (aiguilles de la première et la deuxième pousse de croissance, tiges et racines),

En conditions naturelles, on procède à des analyses saisonnières pour les paramètres physiologiques et morphologiques.

2.2.3- Paramètres biochimiques :

- **Dosage de la proline** : la méthode suivie est celle de Troll et Lindsley (1955) (Annexe2.1).
- **Dosage des sucres solubles** : par la méthode de Dubois *et al.*, (1956) (Annexe2.2).
- **Dosage des pigments chlorophylliens** : la méthode utilisée est celle de Mac Kinney (1941) (Annexe 2.3).
- **Dosage des protéines** : par la méthode de Lowry (1951) (Annexe2.4).

2.2.4- Mesure de la résistance stomatique :

Les mesures de la résistance stomatique ont été réalisées à l'aide d'un Poromètre de type AP4 dont le principe opératoire est d'appliquer une chambre de transpiration sur la feuille transpirante. L'appareil permet de fournir les valeurs de la résistance stomatique, la température, l'éclairement et l'humidité relative.

Sur chaque aiguille, la résistance des deux faces est mesurée sur trois échantillons. Le poromètre est calibré avant chaque mesure.

-Mesure de la résistance stomatique des plants stressés par les hautes températures:

Cette mesure consiste à exposer les plants à des hautes températures (38°C, 40°C, 42°C et 44°C) et de mesurer la résistance stomatique (RS).

La résistance globale exprimée en $\text{m}^2\text{s mol}^{-1}$ est obtenue par la formule suivante (Cruizat, 1979 in Albouchi et *al.*, 2001) :

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_{si}} + \frac{1}{R_{ss}}$$

R_{si} : Résistance stomatique de la face inférieure.

R_{ss} : Résistance stomatique de la face supérieure.

La température en (°C).

L'éclairement en $\mu\text{mol m}^2\text{s}^{-1}$.

Chaque valeur des paramètres (Rs, T et L) représente une moyenne de trois mesures.

- Mesure de l'évolution journalière de la résistance stomatique :

Les mesures ont été effectuées pendant des journées ensoleillées (mois de Mai et Juillet), sur les deux faces de la feuille à partir de 8 heures jusqu'à 16 heures et avec un intervalle de deux heures entre les deux mesures.

2.2.5- Paramètres morphologiques :

Elles concernent seulement les plants élevés en conditions naturelles. Les paramètres biométrique mesurées sont : la longueur de la tige (LT), la longueur des racines (LR), poids sec de la partie aérienne et racinaire (PSA, PSR). Toutes les valeurs données sont les

moyennes de trois mesures. Les différentes mesures de la longueur ont été effectuées à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de $1/100^{\text{ème}}$ cm, et les pesées au moyen d'une balance électronique de précision à 0.001 g près.

Le taux relatif de croissance (TRC) a été calculé de la façon suivante:

$$\text{TRC} = [\ln(\text{BS2}) - \ln(\text{BS1})] / t$$

avec : **BS2**: biomasse sèche totale au temps T_n et **BS1**: biomasse sèche totale au temps T_{n-1} (une saison d'intervalle).

Ainsi, les mesures de la longueur de la tige (LT), la longueur des racines (LR), nous ont permis, en premier lieu, de calculer la vitesse d'allongement des tiges (VAT) et des racines (VAR) entre les temps $t_{(n)}$ et $t_{(n+1)}$ (une saison d'intervalle) selon les formules suivantes:

$$VAT = \frac{LT_{(n+1)} - LT_{(n)}}{t_{(n+1)} - t_{(n)}} \qquad VAR = \frac{LR_{(n+1)} - LR_{(n)}}{t_{(n+1)} - t_{(n)}}$$

2.2.6- L'étude statistique:

Les résultats, présentés sous forme de courbes ou d'histogrammes, rejoignent le plus souvent des valeurs moyennes encadrées par leur écart-type, ces derniers ont été réalisés par le logiciel Excel. L'analyse de variance est utilisée de façon à mettre en évidence des différences entre traitements ou saisons pour un paramètre donné. La variance a été analysée à deux niveaux afin de dégager les effets des principaux facteurs et ceux des interactions entre facteurs. Les analyses de variance, les coefficients de corrélation ont été déterminés grâce au logiciel MINITAB version 13.31 (2000).

Afin de dégager des groupes homogènes, les résultats obtenus par l'analyse de la variance sont soumis au test de Newman et Keuls au seuil de 5% à l'aide de logiciel (XLSTAT 2008).

Partie 3

Résultats et discussion

Chapitre 1 : Réponses physiologiques du pin d'Alep au stress thermique :

1-1- Traitements thermiques à basse température :

1-1-1-La proline :

Les résultats de la teneur en proline chez les semis du pin d'Alep, illustrés dans la figure 20, montrent que les basses températures ont induit une très grande accumulation de la proline au niveau des différents organes. Les teneurs les plus élevées sont enregistrées pour le traitement thermique à -6°C et cela pour les différents organes testés, accusant pratiquement des taux d'augmentation allant de 596.07% à 891.33% par rapport au témoin. Par contre les valeurs les plus faibles sont relevées pour les plants à $+2^{\circ}\text{C}$ avec des taux d'augmentation de 180.13% pour les aiguilles des anciennes pousses, 198.78% pour les jeunes pousses, 162.95% pour les tiges et 212.99% pour les racines (Annexe3 ; Tab.8).

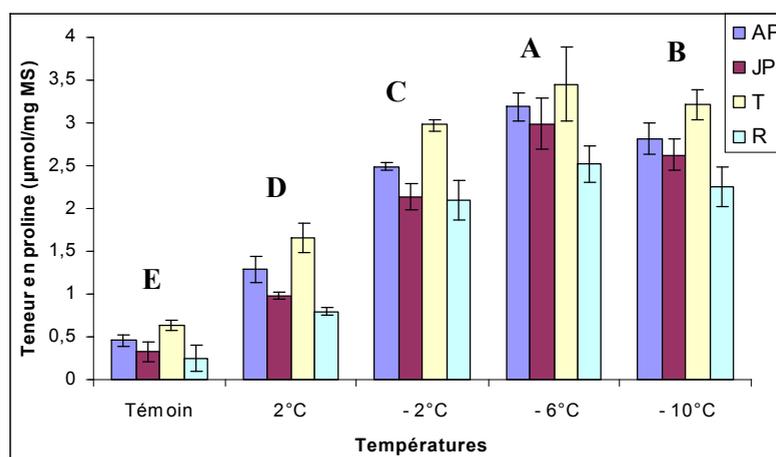


Fig.20: Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction du traitement thermique à basse température

La teneur en proline évolue différemment en fonction du traitement thermique appliqué et selon l'organe testé (Fig.20). Pour les organes, les teneurs les plus élevées sont enregistrées au niveau de tiges, accusant pratiquement des taux d'augmentation de 162%, de 372%, de 448% et de 410 % aux températures de 2°C , -2°C , -6°C et -10°C respectivement. Les faibles teneurs sont observées au niveau des racines et présentent des gains en proline allant de 212% à 891%(Annexe3 ; Tab.8).

L'analyse de la variance à deux critères de classifications montre des variations très hautement significatives pour le facteur traitement thermique avec une probabilité ($p=0.000$) et la variable organe avec une probabilité ($p=0.000$) (Annexe 6 ; Tab.4).

Les comparaisons des moyennes réalisées par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5%, nous donnent 5 groupes distincts, où on note que le premier groupe (A) correspond à la température -6°C avec la valeur maximale (3.036 $\mu\text{mol/mg MS}$), le dernier groupe (E) correspond à la température 20°C (le témoin) présentant la plus faible moyenne (0.418 $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 6 ; Tab.6).

Pour le facteur organe, l'analyse de la variance fait ressortir une différence très hautement significative (Annexe 6 ; Tab.4). On peut conclure donc que les organes se distinguent significativement par le taux d'accumulation de la proline. Le test de Newman-keuls au seuil de 5% donne 4 groupes homogènes, le premier (A) correspond aux tiges qui marquent la moyenne la plus élevée (2.383 $\mu\text{mol/mg MS}$), le dernier groupe (C) correspond aux aiguilles des jeunes pousses et les racines avec des moyennes respectives de 1.81 et 1.585 $\mu\text{mol/mg MS}$ (Annexe 6 ; Tab.6).

1.1.2- Les sucres solubles :

La figure 21 montre l'accumulation des sucres solubles de différents organes des semis de pin d'Alep sous l'effet des basses températures. Elle montre une forte accumulation des sucres solubles chez les semis subissant un traitement thermique à -10°C. A ce niveau de stress, les taux d'augmentations sont de l'ordre de 445.02% pour les aiguilles des anciennes pousses, 269.9% pour les jeunes pousses, 122.04% pour les tiges et 123.98% au niveau des racines par rapport au témoin (Annexe 3 ; Tab.10). En effet, on constate que la diminution de la température appliquée a occasionné une forte accumulation des sucres solubles au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep.

Au niveau des organes, les teneurs les plus élevés sont signalés au niveau des aiguilles des deux pousses de croissance avec des taux d'augmentation allant de 70.83% à 445.02% par rapport au témoin. En fin, les racines présentent les plus faibles teneurs en sucres solubles par rapport aux autres organes, elle passe de $219.22 \pm 5.73 \mu\text{mol/mgMS}$ pour les semis à +2°C à $516.42 \pm 5.81 \mu\text{mol/mgMS}$ pour le traitement thermique de -10°C (Annexe 3 ; Tab.9).

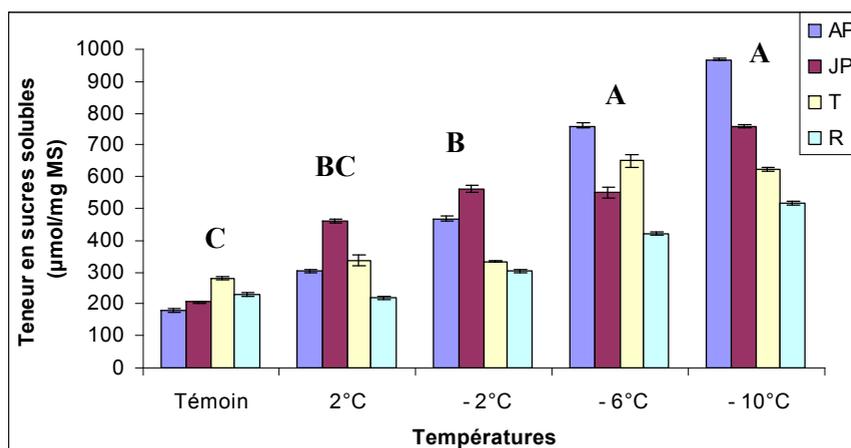


Fig.21: Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à basse température

Les résultats de l'analyse de la variance à deux critères de classification (température et organe) montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les températures ($p=0.000$) et significative entre les organes ($p=0.016$) (Annexe 6 ; Tab.4).

Les comparaisons des moyennes réalisées par le test de Newman et Keuls au seuil de 5%, donne 4 groupes distincts, où effectivement on note que le premier groupe (A) comprend les température -10°C et -6°C avec les moyennes les plus élevées (716.882 et 595.015 $\mu\text{mol/mg MS}$ respectivement), le dernier groupe (C) correspond à la température 20°C (le témoin), qui présente la plus faible moyenne (223.503 $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 6 ; Tab.7).

Pour le facteur organes, la comparaison des moyennes révèle l'existence de trois groupes homogènes, le premier (A) englobe les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses, le dernier groupe comprend les racines avec une faible moyenne (337.435 $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 6 ; Tab.7).

1.1.3 - Les protéines :

La figure 22 montre que les semis stressés ont réagi aussi par l'accumulation des protéines au niveau des différents organes. La teneur la plus élevée est observé chez les semis traitées à -6°C pour les anciennes pousses, et -10°C pour les autres organes testées.

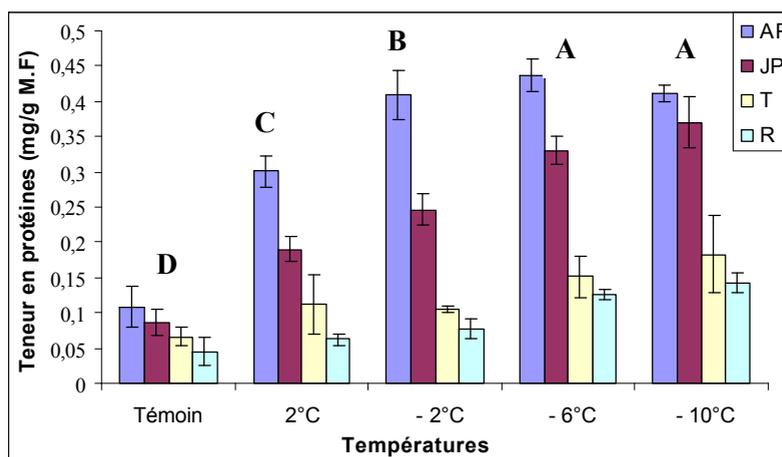


Fig.22: Variation des teneurs en protéines dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction du traitement thermique à basse température

L'accumulation des protéines dépend étroitement du traitement thermique appliqué et de la nature de l'organe (Fig.22). En termes de teneur, les racines accumulent moins de protéines que les tissus caulinaires et foliaires. À -10°C , ces teneurs dans les racines sont estimées à 0.143 ± 0.014 mg/g MF soit un taux d'accumulation de 217.77% par rapport au témoin, tandis qu'au niveau des tiges et des aiguilles jeunes et adultes, elles dépassent 0.183, 0.370 et 0.412 mg/g MF, respectivement (Annexe 3 ; Tab.11).

L'analyse de la variance à deux critères de classification permet de mettre en évidence un effet très hautement significatif entre les traitements thermiques et entre les organes ($p=0.000$) (Annexe 6 ; Tab.4).

La comparaison des moyennes réalisées par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5%, donne 4 groupes distincts, où effectivement on note que le premier groupe (A) englobe les températures -10°C et -6°C avec les valeurs maximales de 0.277 mg/g MF et (0.261 mg/g MF) respectivement, alors que le dernier groupe (D) correspond à la température 20°C (le témoin) qui présente la plus faible moyenne (0.076 mg/g MF) (Annexe 6 ; Tab.8).

Pour le facteur organe, le test de Newman-keuls au seuil de 5% donne 3 groupes homogènes, le premier (A) correspond aux aiguilles des anciennes pousses qui marquent la moyenne la plus élevée (0.333 mg/g MF), alors que les tiges et les racines occupent le dernier groupe (C) et affichent les plus faibles moyennes de 0.124 mg/g MF et 0.091 mg/g MF (Annexe 6 ; Tab.8).

1.1.4 - La chlorophylle :

- La chlorophylle « a » :

L'examen du graphe 23 montre que, dans les aiguilles des semis de pin d'Alep, le contenu en chlorophylle « a », diminue fortement dès l'application du traitement thermique à basses températures. En effet, après un traitement à 2°C, on note une baisse de la chlorophylle « a » de 33.25% au niveau des anciennes pousses et de 29.81% au niveau des jeunes pousses par rapport au témoin. Cette diminution s'accroît au fur et à mesure que la température appliquée diminue : à -2°C elle atteint 41.80% pour les anciennes pousses et 35.33% au niveau des jeunes pousses, pour le traitement le plus sévère (-10°C), la baisse de la teneur en chlorophylle « a » est estimée à 54.73% pour les anciennes pousses et 61.04% pour les jeunes pousses par rapport au témoin (Annexe 3 ; Tab.14).

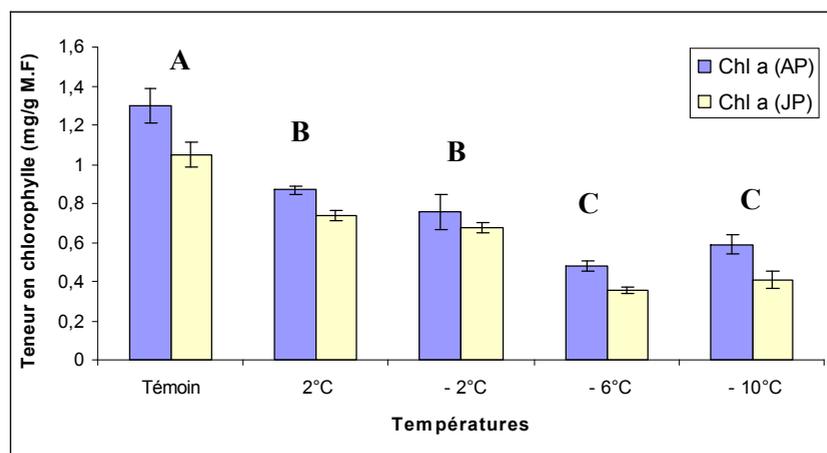


Fig.23: Variation des teneurs en chlorophylle « a » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à basse température

L'analyse de la variance est très hautement significative pour les différents traitements thermiques et même pour les aiguilles des deux pousses ($p=0.000$) (Annexe 6 ; Tab.4). Le test de Newman-keuls classe les températures en trois groupes homogènes. Le premier groupe (A) correspond à la température de 20°C (témoin) auquel les aiguilles des semis de pin d'Alep synthétisent fortement le chlorophylle « a » avec une moyenne 1.175 mg/g M.F, le deuxième groupe (B) englobe les températures +2°C et -2°C, le dernier groupe (C) englobe les températures -10°C et -6°C avec des faibles teneurs 0.498 et 0.418 mg/g M.F successivement (Annexe 6 ; Tab.9).

La comparaison des moyennes pour le facteur organe fait sortir 2 groupes homogènes dont le premier groupe correspond aux aiguilles des anciennes pousses de croissance avec la plus forte moyenne (0.798 mg/g M.F) et le second groupe englobe les aiguilles des jeunes pousses avec une faible moyenne (0.646 mg/g M.F) (Annexe 6 ; Tab.9).

-La chlorophylle « b » :

L'application des traitements thermiques à basses températures entraîne une chute des teneurs en chlorophylle « b » au niveau des aiguilles des semis de pin d'Alep qui restent toutefois inférieurs à celles enregistrées chez les plantes témoins (Fig.24). Les teneurs les plus faibles sont observées après l'application du traitement thermique à -6°C avec des taux de diminution allant de 79.66% pour les aiguilles des anciennes pousses à 77.77% au niveau des jeunes pousses. À -10°C , ces taux varient de 64.59% à 68.62% respectivement pour les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses (Annexe 3 ; Tab.14).

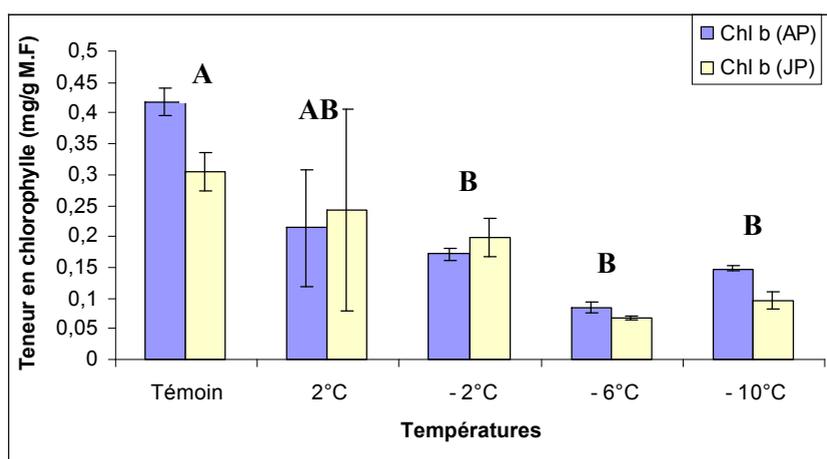


Fig.24: Variation des teneurs en chlorophylle « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à basse température

L'analyse de la variance est très hautement significative pour les différentes températures ($p=0.000$) et non significative pour les deux pousses de croissance ($p=0.278$) (Annexe 6 ; Tab.4).

L'analyse statistique des données par le test de Newman et Keuls fait ressortir trois groupes de moyennes homogènes. Le premier (A) comporte la température 20°C (témoin) avec la moyenne la plus élevée (0.362 mg/g M.F), le deuxième groupe intermédiaire (AB) englobe la température $+2^{\circ}\text{C}$, le dernier groupe (B) correspond aux températures (-2°C , -10°C et -6°C) (Annexe 6 ; Tab.10).

- La chlorophylle totale :

Comparativement aux plants témoins, on observe pour les traitements thermiques allant de +2 à -10°C, une diminution des teneurs en chlorophylle totale chez les aiguilles des deux pousses de croissance (Fig.25).

Pour le traitement -6°C, la diminution pour les deux pousses est de 68%. Le traitement -10°C présente une réduction comprise entre 57.15% et 62.75%. Pour l'ensemble des traitements thermiques, on remarque que les teneurs les plus faibles sont toujours affichées au niveau des aiguilles des jeunes pousses (Annexe 3 ; Tab.14).

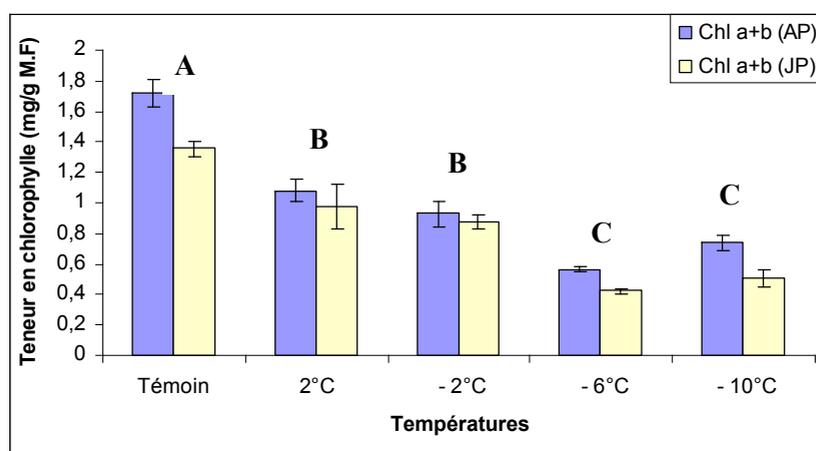


Fig.25: Variation des teneurs en chlorophylle totale dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à basse température

Le test de l'analyse de la variance à deux facteurs de classification (température et organes), montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les températures et entre les organes ($p=0.000$) (Annexe 6 ; Tab.4).

Ces résultats sont vérifiés par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5% qui effectivement nous isole trois groupes homogènes pour le facteur température, le premier (A) correspond à la température 20°C (témoin) avec la moyenne la plus élevée (1.537 mg/g M.F), le deuxième groupe (B) englobe les températures (+2°C et -2°C), le troisième groupe (C) comprend les restes des températures (-10°C et -6°C) (Annexe 6 ; Tab.11).

Concernant les organes, le test de Newman-keuls nous isole deux groupes homogènes qui sont classés comme suit : les anciennes pousses avec une moyenne de 1.005 mg/g M.F

dans le groupe (A) et les jeunes pousses avec une moyenne de 0.828 mg/g M.F pour le groupe (B) (Annexe 6 ; Tab.11).

- La chlorophylle a / b :

Les résultats présentés sur la figure 26 montrent les variations du rapport chlorophylle « a » sur la chlorophylle « b » en fonction des traitements thermique à basse température. Le traitement à -10°C a engendré une augmentation de 23 % alors que les plants sous traitement à 2°C ont montré une augmentation de 46.91 et 76.92% au niveau des aiguilles des anciennes et jeunes pousses successivement (Annexe 3 ; Tab.14).

Donc, on peut dire que les semis stressés réagissent par une baisse de leur teneur en chlorophylle totale et une augmentation du rapport chlorophylle a/chlorophylle b.

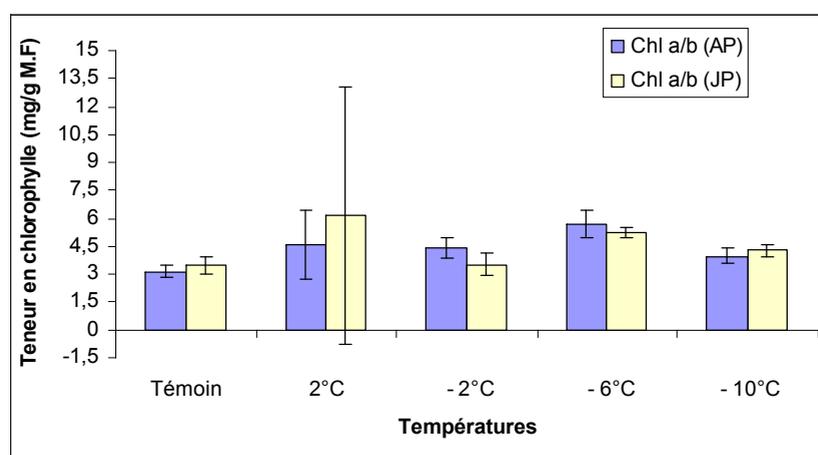


Fig.26: Variation des teneurs en chlorophylle a/b dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à basse température

L'analyse de la variance à deux critères de classification est non significative en fonction des températures et même en fonction des organes ($p > 0.05$) (Annexe 6 ; Tab.4).

1.1.5- Corrélation entre les variables :

La matrice suivante renferme 7 variables; chacune d'elle est mesurée après un traitement thermique à bases températures au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep. En gras, les variables pour lesquelles une corrélation est significative au seuil de 5%.

Tab.13 : Matrice de corrélation des principaux paramètres physiologiques mesurées après l'application des traitements thermiques à basse température

Variables	Proline	Sucres solubles	Protéines	Chl "a"	Chl "b"	Chl (a+b)	Chl (a/b)
Proline	1						
Sucres solubles	0,702	1					
Protéines	0,894	0,822	1				
Chl "a"	-0,867	-0,764	-0,924	1			
Chl "b"	-0,741	-0,572	-0,681	0,736	1		
Chl (a+b)	-0,879	-0,747	-0,901	0,974	0,870	1	
Chl (a/b)	0,234	0,139	0,096	-0,245	-0,777	-0,333	1

Au seuil de 5%, les teneurs en proline après les traitements thermiques à basse température sont positivement corrélées aux teneur en sucres solubles ($r = 0.702$), au teneur en protéines ($r = 0.894$) et négativement corrélés au teneurs en chlorophylle « a », chlorophylle « b » et à la chlorophylle totale (Tab.13).

En outre, nous enregistrons une liaison positive entre les teneurs en sucres solubles et les teneurs en protéines avec une valeur de $r = 0.822$. Ainsi les teneurs en sucres solubles sont négativement corrélées aux teneur en chlorophylle « a » ($r=-0.764$) et à la chlorophylle totale ($r=-0.747$).

Concernant les teneurs en protéines, elles sont négativement corrélées aux teneur en chlorophylle « a » ($r=-0.924$), chlorophylle « b » ($r=-0.681$) et au chlorophylle totale ($r=-0.901$). Alors que les teneurs en chlorophylle « a » sont positivement corrélées aux teneur en chlorophylle « b » ($r = 0.736$) et au chlorophylle totale ($r=0.974$).

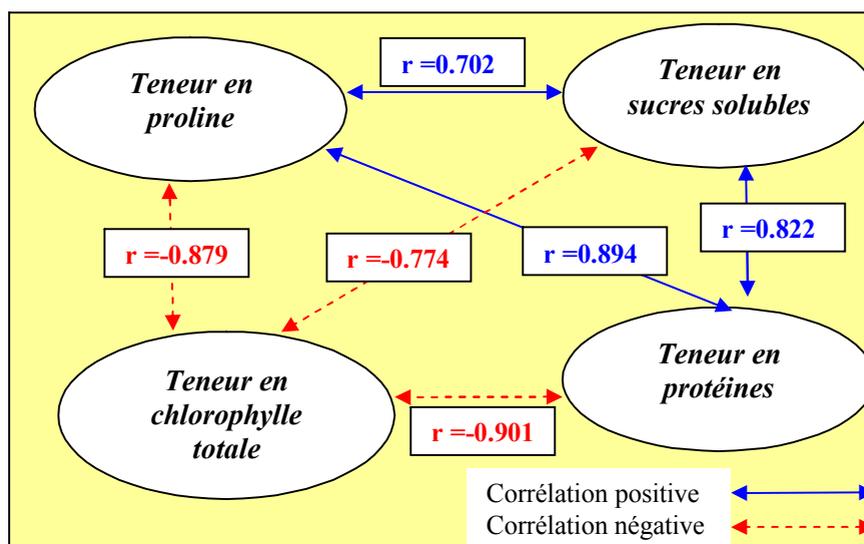


Fig.27: Corrélation entre les paramètres biochimiques des semis de pin d'Alep soumis à des températures fraîches

1.2- Traitements thermiques à haute température :

1.2.1-La proline :

D'après la figure 28, on constate que l'accumulation de la proline dans les tissus de la plante dépend de l'intensité du stress thermique et de la nature de l'organe testés. En effet, les hautes températures induisent une augmentation des teneurs en proline dès le premier traitement appliqué (38°C). Après un traitement thermique à 42°C, elles atteignent 963.97, 1285.67, 878.37 et 1306.29% par rapport au témoin respectivement dans les aiguilles des pousses adultes et des jeunes pousses, les tiges et les racines. Par contre la température 38°C provoque des taux d'accumulation faible par rapport aux autres traitements thermiques.

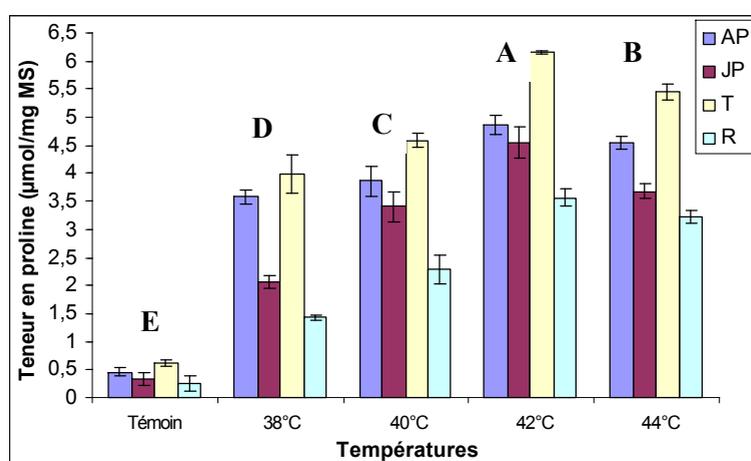


Fig.28 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à haute température

En fonction des organes, ce sont les tiges qui montrent la teneur la plus élevée qui passe de $3.99 \pm 0.33 \mu\text{mol/mg MS}$ pour le traitement à 38°C à $6.15 \pm 0.03 \mu\text{mol/mg MS}$ pour le traitement à 42°C. Par contre les teneurs les plus faibles sont enregistrés au niveau des racines avec des taux d'augmentation qui varient de 466.35% à 1306.29% respectivement pour les températures 38°C et 42°C (Annexe 3 ; Tab.8).

Ces résultats montrent des variations importantes pour la teneur en proline au niveau des traitements thermiques et même au niveau des organes. Ceci est confirmé par l'analyse de la variance à deux critères de classification qui montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les températures avec une probabilité ($p=0.000$) et entre les organes ($p=0.000$) (Annexe 6 ; Tab.5).

La comparaison des moyennes par le test de Newman-keuls conduit au classement de la température 42°C en première position (groupe homogène A) avec la plus forte moyenne (4,786 $\mu\text{mol/mg MS}$) et le témoin (20°C) en dernier position (groupe homogène E) avec la plus faible teneur (0.418 $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 6 ; Tab.6).

Pour le facteur organe, la comparaison des moyennes fait sortir 4 groupes homogènes dont le premier groupe (A) correspond aux tiges avec la plus forte moyenne (4,164 $\mu\text{mol/mg MS}$), le dernier groupe (D) englobe les racines avec une faible moyenne (2,151 $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 6 ; Tab.6).

1.2.2-Les sucres solubles :

Les résultats illustrés dans la figure 29 montrent que le traitement thermique à 44°C a induit une accumulation remarquable des sucres solubles dans l'ensemble des organes testés à l'exception des tiges qui présentent un maximum d'accumulation après l'application du traitement thermique à 42°C. Par contre la température 38°C provoque des taux d'accumulation faible par rapport aux autres traitements thermiques (379.77%, 361.63%, 250.09% et 108.22% respectivement au niveau des aiguilles des anciennes pousses, des jeunes pousses, des tiges et des racines) (Annexe 3 ; Tab.10).

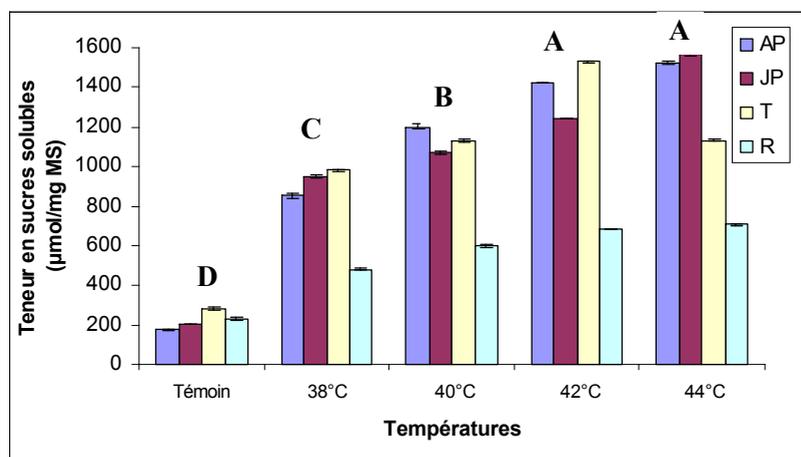


Fig.29: Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à haute température

L'analyse de la variance à deux critères de classification révèle une différence très hautement significative pour les deux facteurs (traitement thermique et organes) avec une probabilité ($P = 0.000$) (Annexe 6 ; Tab.5).

Le test de Newman et Keuls au seuil de 5% donne 4 groupes homogènes où les températures 44°C et 42°C occupent le premier groupe (A) avec les moyennes les plus élevées (1232.711 $\mu\text{mol/mg MS}$ pour la température 44°C et 1170.374 $\mu\text{mol/mg MS}$ pour la température 42°C), alors que le dernier groupe (D) correspond à la température 20°C (témoin) avec la plus faible moyenne (223.504 $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 6 ; Tab.7).

Concernant les organes, la comparaison des moyennes fait sortir deux groupes homogènes, le premier (A) englobe les tiges et les aiguilles des deux pousses de croissance avec les plus fortes moyennes, le second (B) correspond au racines avec la plus faible moyenne (540,294 $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 6 ; Tab.7).

1.2.3 -Les protéines:

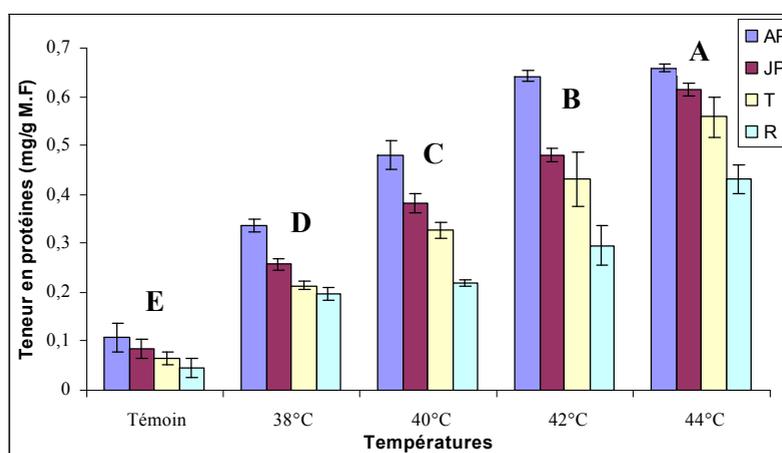


Fig.30: Variation des teneurs en protéines dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à haute température

Les résultats obtenus après le dosage des protéines, effectué sur les organes des semis de pin d'Alep, montrent une différence d'accumulation en fonction des traitements thermiques puisque l'analyse de la variance à deux critères montre des différences très hautement significatives entre les traitements ($p < 0.001$) et entre les organes ($p < 0.001$) (Annexe 6 ; Tab.5). On note aussi que l'application des traitements thermiques à haute température entraîne une augmentation importante des teneurs en protéines, aussi bien dans les organes aériens que racinaires (Fig.30).

De ce fait les teneurs les plus élevées sont enregistrées pour les plants traités thermiquement à 44°C avec des taux d'augmentation qui varient de 510.18% à 860%, alors que les teneurs chez les plants traités à la température 38°C sont faibles par rapport aux autres traitements thermiques (soit un taux d'augmentation de 212% pour les aiguilles des anciennes

pousses, 198% pour les aiguilles des jeunes pousses, 224% pour les tiges et 337% pour les racines) (Annexe 3 ; Tab.12).

Les résultats sont vérifiés par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5%, faisant ressortir cinq groupes : les plants traités par la température 44°C sont affectés au groupe (A) avec la plus forte moyenne (0.566 mg/g MF), alors que le dernier groupe (E) correspond au témoin avec une faible moyenne (0.076 mg/g MF) (Annexe 6 ; Tab.8).

Pour le facteur organe, la comparaison des moyennes donne 4 groupes homogènes, le premier (A) correspond aux aiguilles des anciennes pousses qui marquent la moyenne la plus élevée (0.445 mg/g MF), alors que les racines occupent le dernier groupe (D) et affichent la plus faible moyenne (0.237 mg/g MF) (Annexe 6 ; Tab.8).

1.2.4 – La chlorophylle :

- La chlorophylle « a » :

La diminution des teneurs en pigments chlorophylliens au niveau des aiguilles des semis de pin d'Alep s'accroît avec le traitement thermique appliqué. À 44°C, cette baisse des teneurs en chlorophylle « a », décelée dans les tissus photosynthétiques peut atteindre respectivement -75.98 et -80.28 %, dans les aiguilles des pousses adultes et jeunes pousses (Annexe3 ; Tab.14). De ce fait, le stress thermique tend donc à induire une chute caractéristique de la teneur en chlorophylle "a" dans les aiguilles des semis de pin d'Alep.

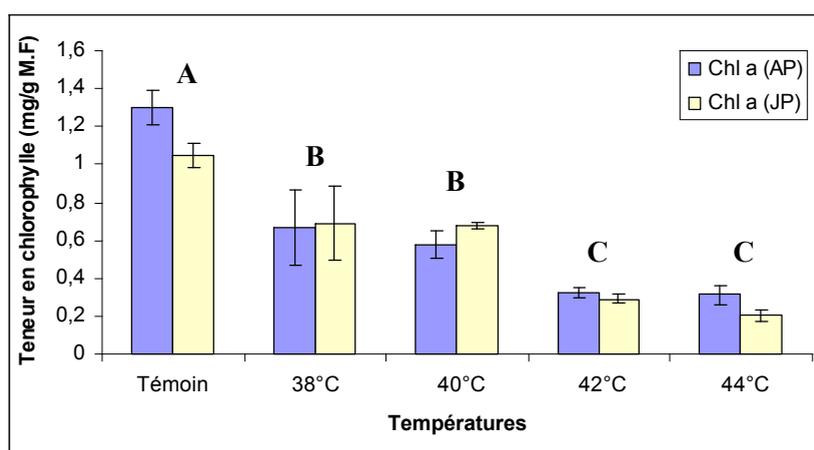


Fig.31: Variation des teneurs en chlorophylle « a » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des températures chaudes

L'analyse de la variance est très hautement significative pour les différentes traitements thermiques et non significative pour les aiguilles de deux pousses de croissance (Annexe6 ; Tab.5).

Le test de Newman-keuls classe les températures en trois groupes homogènes. Le premier groupe (A) correspond à température 20°C (témoin) auquel les aiguilles des semis de pin d'Alep synthétisent fortement la chlorophylle « a » avec une moyenne de 1.175 mg/g M.F, le deuxième groupe (B) regroupe les températures 38°C et 40°C, le dernier groupe (C) englobe les températures 42°C et 44°C avec les plus faibles moyennes (Annexe 6 ; Tab.9).

- La chlorophylle « b » :

D'après la figure 32, on constate que l'augmentation des températures semble être relativement proportionnelle à la baisse des teneurs en pigment chlorophyllien « b » au niveau des aiguilles des semis de pin d'Alep. Les teneurs les plus faibles sont enregistrées après l'application du traitement thermique à 42°C avec un taux de réduction de 88.03% pour les aiguilles des anciennes pousses et de 67.97% pour les aiguilles des jeunes pousses (Annexe3 ; Tab.14).

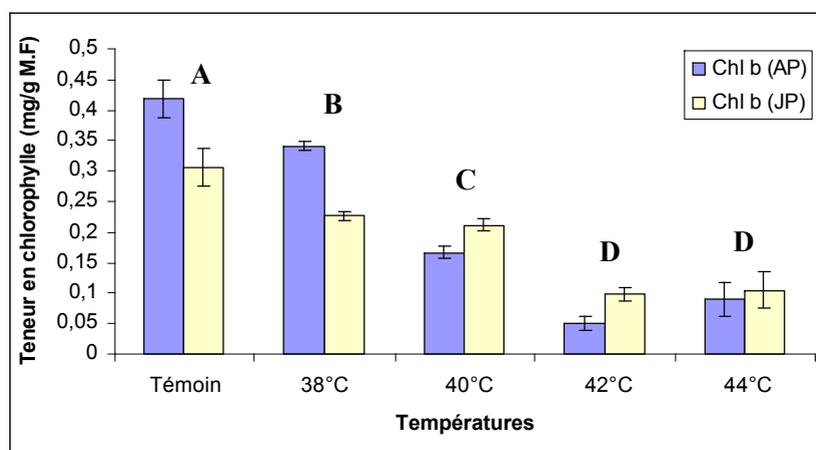


Fig.32 : Variation des teneurs en chlorophylle « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des températures chaudes

L'analyse de la variance est très hautement significative pour les différentes températures et hautement significative pour les aiguilles de deux pousses de croissance (Annexe 6; Tab.5). Le test de Newman et Keuls fait ressortir 4 groupes de moyennes homogènes. Le premier (A) correspond à la température 20°C (témoin) avec la moyenne la plus élevée (0.362 mg/g M.F), le dernier groupe (D) englobe les températures 44°C et 42°C avec des faibles moyennes (Annexe 6 ; Tab.10).

- La chlorophylle totale :

Les teneurs en chlorophylle totale au niveau des aiguilles des semis de pin d'Alep dépendent aussi des températures appliquées (Fig.33). Après les traitements thermiques à haute température, les teneurs en chlorophylle totale au niveau des tissus photosynthétiques baissent, tout en restant inférieurs à celles enregistrées pour le témoin. De ce fait les teneurs les plus faibles sont affichées au niveau des aiguilles des anciennes pousses à 42°C accusant une diminution de 78.40%, alors que les aiguilles des jeunes pousses présentent des teneurs plus faibles à 44°C avec un taux de réduction de l'ordre de 76.99% par rapport au témoin(Annexe3 ; Tab.14).

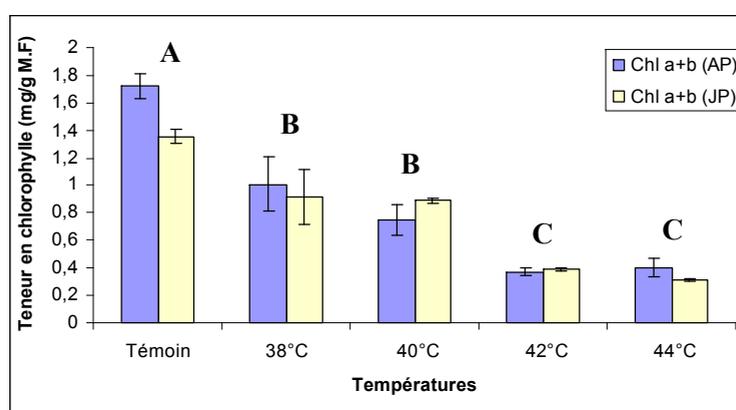


Fig.33: Variation des teneurs en chlorophylle totale dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des températures chaudes

Le test de l'analyse de la variance à deux facteurs de classification (température et organes), montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les températures et non significative entre les organes (Annexe 6 ; Tab.5).

Ces résultats sont vérifiés par le test de Newman et Keuls au seuil de 5% qui effectivement nous isole trois groupes homogènes pour le facteur température, le premier (A) correspond à la température 20°C (témoin) avec la moyenne la plus élevée (1.537 mg/g M.F), le deuxième groupe (B) englobe les températures (38°C et 40°C), le troisième groupe (C) comprend les températures 42°C et 44°C avec les moyennes les plus faibles (Annexe 6 ; Tab.11).

- La chlorophylle a / b :

Les résultats présentés sur la figure 34 montrent les variations du rapport chlorophylle « a » sur la chlorophylle « b » en fonction des traitements thermiques à haute température.

Chez les aiguilles des jeunes pousses ce rapport a diminué de presque 13 % pour les températures 38°C et 42°C, de 8% à 40°C et de 39% à 44°C. Cependant ce rapport a augmenté chez les aiguilles des anciennes pousses pour tous les traitements à l'exception de la température 38°C (Annexe3 ; Tab.14).

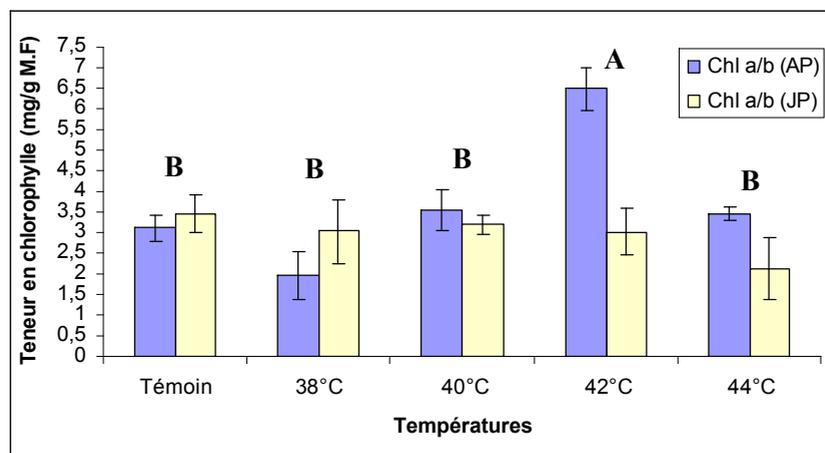


Fig.34: Variation des teneurs en chlorophylle a/b dans les anciennes et les jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des températures chaudes

L'analyse de la contenance de la chlorophylle dans les aiguilles des semis de pin d'Alep, montre non seulement les changements quantitatifs sous l'influence des conditions stressantes, mais aussi le changement de la proportion chlorophylle « a » / chlorophylle « b ». Cette proportion change modérément dans les plants étudiés, mais on observe une tendance à l'augmentation de la chlorophylle « a ». Cela atteste de la résistance relative des semis à l'influence des hautes températures. Les modifications de la quantité et de la proportion des chlorophylles peuvent marquer le degré de tolérance à la contrainte thermique.

L'analyse de la variance est très hautement significative pour les différentes températures et même pour les organes (Annexe 6 ; Tab.5).

Pour le facteur température, le test de Newman et Keuls fait ressortir deux groupes de moyennes homogènes. Le premier (A) correspond à la température 42°C avec la moyenne la plus élevée (4.754), le deuxième groupe (B) englobe les autres températures 40°C, 20°C (témoin), 44°C et 38°C (Annexe 6; Tab.12).

La comparaison des moyennes pour le facteur organe fait sortir 2 groupes homogènes dont le premier groupe correspond aux aiguilles des anciennes pousses de croissance avec la

plus forte moyenne (3.716), le second groupe englobe les aiguilles des jeunes pousses avec la plus faible moyenne (2.964) (Annexe 6 ; Tab.12).

1.2.5- Corrélation entre les variables :

L'étude des différentes corrélations a pour objet de déterminer d'éventuelles relations entre les différents paramètres physiologiques. La matrice est composée de 07 variables (teneur en : proline, sucres solubles, protéines, chlorophylle « a » et « b », chlorophylle totale et chlorophylle « a/b »).

Tab.14 : Matrice de corrélation des principaux paramètres physiologiques mesurés après l'application des traitements thermiques à haute température

<i>Variables</i>	Proline	Sucres solubles	Protéines	Chl "a"	Chl "b"	Chl (a+b)	Chl (a/b)
Proline	1						
Sucres solubles	0,887	1					
Protéines	0,829	0,946	1				
Chl "a"	-0,879	-0,883	-0,917	1			
Chl "b"	-0,963	-0,938	-0,889	0,902	1		
Chl (a+b)	-0,924	-0,919	-0,928	0,991	0,952	1	
Chl (a/b)	0,678	0,468	0,259	-0,319	-0,643	-0,427	1

En gras, les variables pour lesquelles une corrélation est significative au seuil de 5%

Au seuil de 5%, les teneurs en proline après les traitements thermiques à haute température sont positivement corrélées aux teneurs en sucres solubles ($r=0.887$) et au teneur en protéines ($r=0.829$), mais elles sont négativement corrélés au teneurs en chlorophylle « a » ($r= -0.879$), chlorophylle « b » ($r= -0.963$) et au chlorophylle totale ($r= -0.924$) (Tab.14).

Ainsi, les teneurs en sucres solubles sont positivement corrélées aux teneurs en protéines ($r= 0.946$) et négativement corrélées aux teneur en chlorophylle « a » ($r=-0.883$), chlorophylle « b » ($r=-0.938$) et en chlorophylle totale ($r=-0.919$).

En effet, une corrélation négative de l'ordre de -0.917, -0.889 et -0.928 est observée entre les teneurs en protéines d'une part et les teneurs en chlorophylle « a », en chlorophylle « b » et en chlorophylle totale d'autre part (Fig.35).

Concernant les teneurs en chlorophylle « a », elles sont positivement corrélées aux teneur en chlorophylle « b » ($r=0.902$) et au teneur en chlorophylle totale ($r=0.991$).

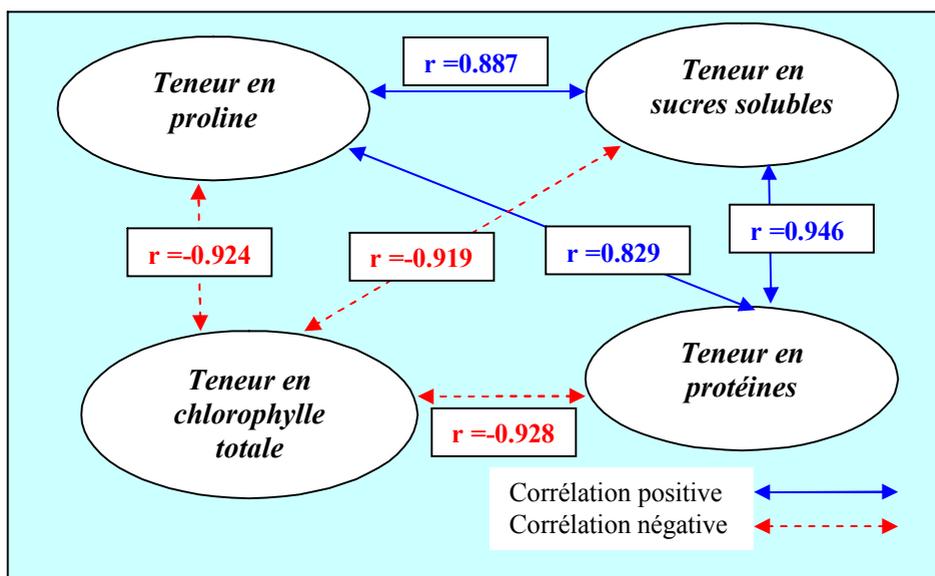


Fig.35: Corrélation entre les paramètres biochimiques des semis de pin d'Alep soumis à des températures chaudes

1.3- Caractéristiques des traitements thermiques appliqués :

Dans cette partie, on a essayé de présenter quelques indices pour mieux caractériser les stress thermiques appliqués.

Tab.15 : Caractéristiques des traitements thermiques appliqués

Traitements thermiques	Basses températures				Hautes températures			
	2°C	- 2°C	- 6°C	- 10°C	38°C	40°C	42°C	44°C
Durée (en heure)	3	3	3	3	3	3	3	3
Poids (en °C)	0	4	8	12	4	6	8	10
Intensité (en °C/heure)	0	1,33	2,67	4	1,33	2	2,67	3,33

- **La durée de stress** : pour l'ensemble des traitements thermiques appliqués, la durée du stress est de trois heures successives (Tab.15).

- **Le poids (en °C)** : dans la partie précédente on a calculé la moyenne des maxima du mois le plus chaude ($M=33.91^{\circ}\text{C}$) et la moyenne des minima du mois le plus froid ($m=2.07^{\circ}\text{C}$) sur une période de 10 ans « 1998 – 2007 » pour mieux définir les stress. Le poids du stress représente l'écart entre la température appliquée durant le traitement thermique et celle considérée comme référence (m pour les basses températures ou M pour les hautes températures). Par exemple : le traitement thermique le plus sévère (-10°C) aura un poids

suffisamment important ($2^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C}) = 12^{\circ}\text{C}$). Par contre le stress thermique à -2°C est léger (poids de 4°C) (Tab.15).

- **L'intensité** : c'est le poids par rapport à la durée (en $^{\circ}\text{C}/\text{heure}$). Pour les basses températures, le traitement le plus sévère (-10°C) est considéré comme le plus intense ($4^{\circ}\text{C}/\text{heure}$) (Tab.15). Alors que l'intensité du traitement thermique à 2°C est nulle. Concernant les traitements thermiques de hautes températures, l'intensité du stress varie de $1.33^{\circ}\text{C}/\text{h}$ à $3.33^{\circ}\text{C}/\text{h}$.

1.3.1- Accumulation des marqueurs biochimiques au niveau de la plante entière en fonction des traitements thermiques :

1.3.1.1- La proline :

La figure 36 montre que la teneur en proline augmente avec le niveau de stress appliquée et que les traitements thermiques à haute température induit une accumulation de la proline plus importante que celle des basses températures. Dès que les plants sont stressés à -6°C , cet acide aminé augmente significativement dans les aiguilles, les tiges et les racines; sa teneur représente 7 fois plus celle du témoin (12.144 contre $1.669 \mu\text{mol}/\text{mg MS}$).

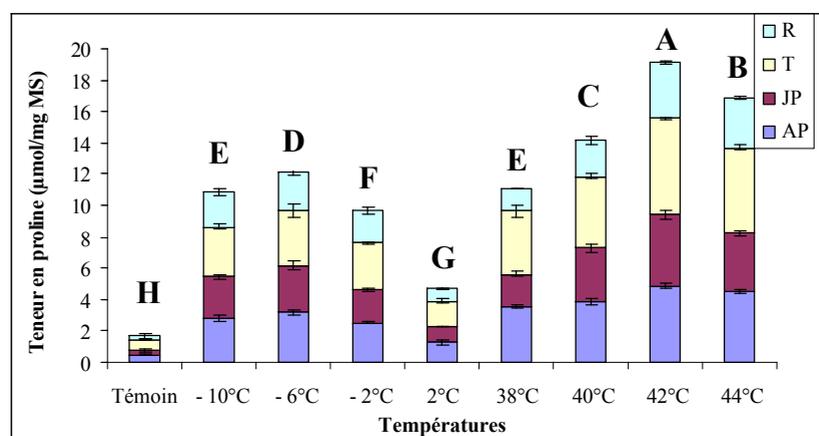


Fig.36: Variation du taux de la proline en fonction des traitements thermiques

En effet, sous un traitement thermique à 42°C et un intensité de $2.67^{\circ}\text{C}/\text{heure}$, la proline s'accumule fortement au niveau de la plante entière; elle augmente environ 11 fois que le témoin (19.14 contre $1.669 \mu\text{mol}/\text{mg MS}$). Il faut noter aussi que la teneur en proline des aiguilles et même des tiges est significativement plus élevée que celles des racines. L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative pour les deux facteurs traitements thermiques et organes avec une probabilité ($P=0.000$)(Annexe6 ; Tab.13).

Selon la figure 36, les teneurs en proline décroissent dans l'ordre suivant :

$$[42^{\circ}\text{C}] > [44^{\circ}\text{C}] > [40^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [38^{\circ}\text{C}] > [-10^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [2^{\circ}\text{C}].$$

Nous remarquons que c'est le traitement à haute température de 42°C qui signale les teneurs les plus élevées au niveau des différents organes, alors que la température 2°C accumule le moins.

1.3.1.2- Les sucres solubles :

D'après la figure 37, on constate que la diminution des basses températures appliquées occasionne une augmentation progressive de la teneur des plants en sucres solubles. La contrainte thermique à haute température entraîne également, au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep une accumulation plus marquée de cet osmolyte.

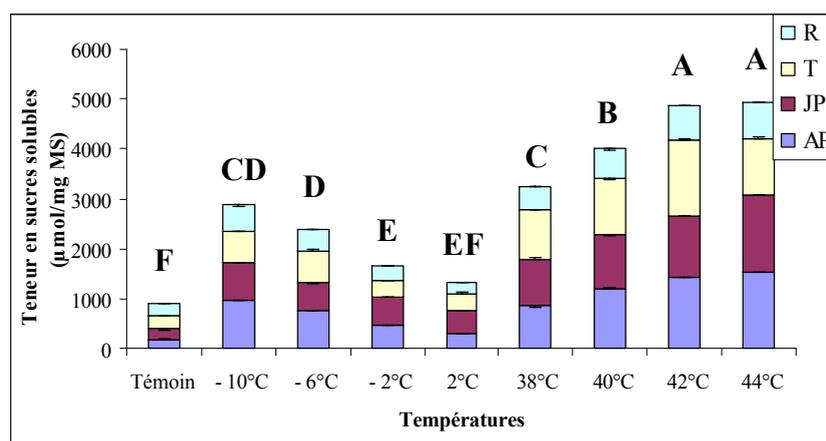


Fig.37: Variation du taux des sucres solubles en fonction des traitements thermiques

Sous traitement thermique à -10°C, cette augmentation atteint 220.74% de plus que le témoin, alors qu'à 44°C caractérisé par une intensité de 3.33°C/heure, elle dépasse 450%, avec toutefois une accumulation de la majeure partie des sucres solubles au niveau de la partie aérienne par rapport aux racines. L'analyse de la variance est très hautement significative pour les traitements thermiques ($p < 0.001$) et même pour les organes testés ($p < 0.001$) (Annexe 6 ; Tab.13).

Le classement des traitements thermiques en fonction de la teneur en sucres solubles s'établit pour la plante entière avec la séquence suivante :

$$[44^{\circ}\text{C}] > [42^{\circ}\text{C}] > [40^{\circ}\text{C}] > [38^{\circ}\text{C}] > [-10^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [2^{\circ}\text{C}]$$

L'analyse des résultats montre que le traitement le plus accumulant des sucres solubles est le traitement à haute température de 44°C avec un ordre de grandeur de 5.5 fois plus que le témoin alors que le traitement à basse température de 2°C enregistre les teneurs les plus faibles.

1.3.1.3- Les protéines :

L'observation des teneurs en protéines sous les différents traitements thermiques (à basse et haute température) montre que, d'une part, l'accumulation des protéines dépend étroitement du traitement thermique appliqué et de la nature de l'organe; d'autre part l'effet le plus remarquable du stress thermique est observé pour les traitement à haute température d'où une accumulation importante des protéines pour le traitement le plus intense (44°C).

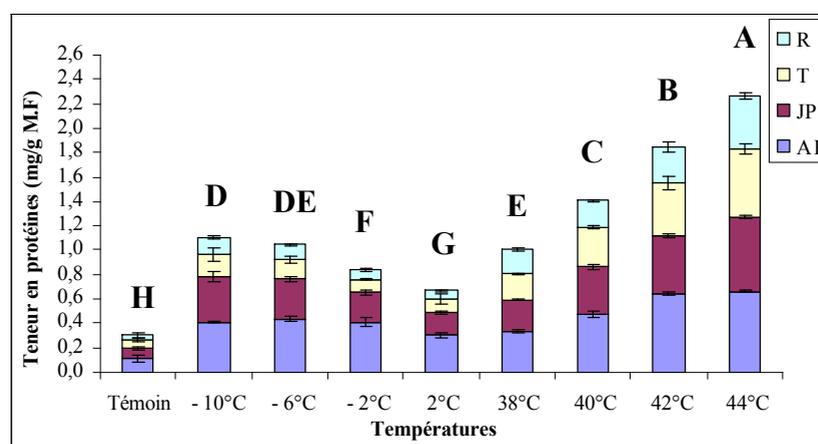


Fig.38: Variation du taux de protéines en fonction des traitements thermiques

En terme de teneur, les racines accumulent moins de protéines que les tissus caulinaires et foliaires. Le traitement thermique des semis de pin d'Alep à -10°C a induit une accumulation importante des protéines au niveau de la plante entière (Soit un gain de 263.27% par rapport au témoin). Cependant sous contrainte thermique à hautes températures, l'accumulation des protéines est très importante et signale des taux d'augmentation plus élevées: 229.50%, 361.96%, 506.55, et 642.29% respectivement pour les traitements à 38°C, 40°C, 42°C et 44°C. L'analyse de la variance à deux critères de classification permet de mettre en évidence un effet très hautement significatif entre les traitements thermiques et entre les organes ($p=0.000$) (Annexe 6 ; Tab.13).

Selon la figure 74, les teneurs en protéines décroissent dans l'ordre suivant :

$$[44^{\circ}\text{C}] > [42^{\circ}\text{C}] > [40^{\circ}\text{C}] > [-10^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [38^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [2^{\circ}\text{C}].$$

D'un point de vue quantitatif, nous remarquons que le traitement le plus sévère 44°C représente le traitement le plus accumulant de protéines au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep, alors que la température 2°C est moins accumulante de protéines.

1.3.1.4- La chlorophylle totale :

Dans nos conditions expérimentales, pour les anciennes et les jeunes pousses, la teneur en chlorophylle totale est fortement diminuée par la contrainte thermique. En effet, les traitements thermiques à haute température a induit une diminution plus forte par rapport aux basses températures, soit une diminution de l'ordre de 75.24% et 76.77% respectivement pour les traitement sévères à 42°C et 44°C (Fig.39). L'analyse de la variance est très hautement significative pour les différents traitements thermiques et même pour les aiguilles des deux pousses ($p=0.000$) (Annexe 6 ; Tab.13).

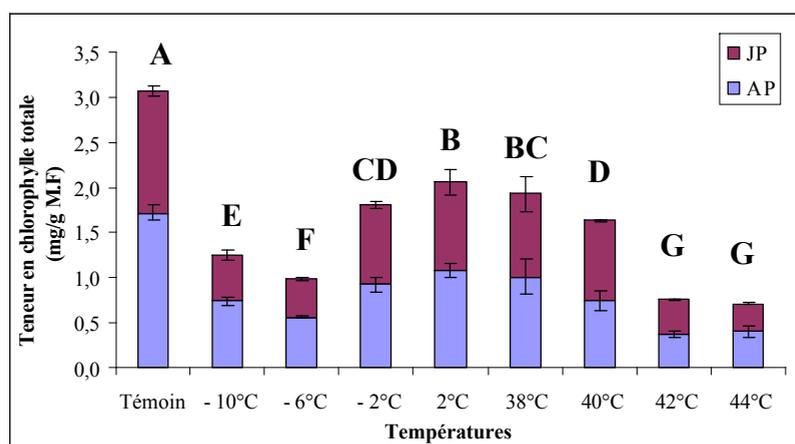


Fig.39: Variation de la teneur en chlorophylle totale en fonction des traitements thermiques appliquées

Selon la figure 74, les teneurs en chlorophylle total décroissent dans l'ordre suivant :

$$[2^{\circ}\text{C}] > [38^{\circ}\text{C}] > [-2^{\circ}\text{C}] > [40^{\circ}\text{C}] > [-10^{\circ}\text{C}] > [-6^{\circ}\text{C}] > [42^{\circ}\text{C}] > [44^{\circ}\text{C}].$$

La variation quantitative des teneurs en chlorophylle totale montre que le traitement à haute température de 44°C représente le traitement le moins accumulant de la chlorophylle totale.

En effet, une légère corrélation positive de l'ordre de 0.640, 0.574 et 0.603 a été observée entre l'intensité du stress d'une part et le cumul de la proline, des sucres solubles et

des protéines d'autre part (Fig.40a,b,c). Quant au cumul de la chlorophylle totale, il est corrélé négativement avec l'intensité du stress ($r = -0,811$) (Fig.40d).

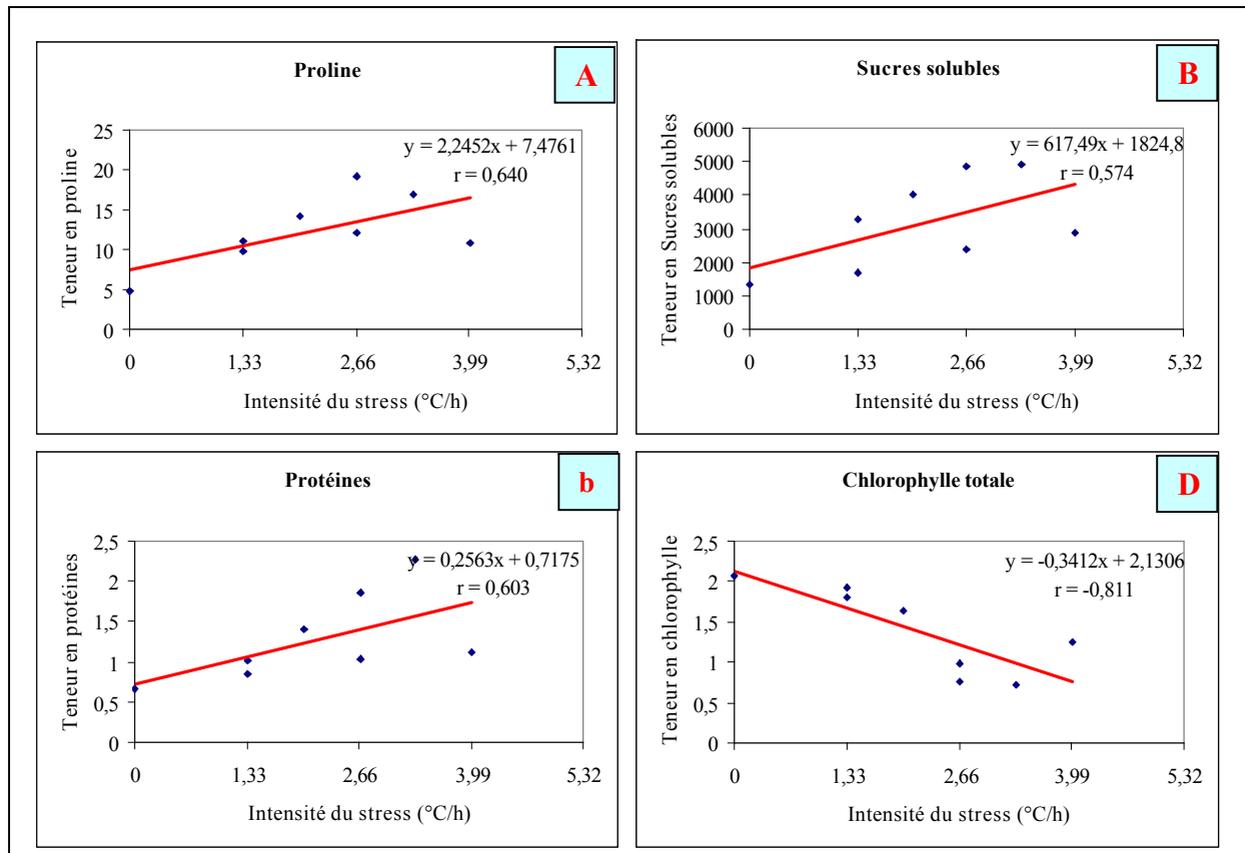


Fig.40: Corrélations entre l'intensité du stress appliqué et le cumul des marqueurs biochimiques testés (Proline (A), Sucres solubles (B), protéines (C) et chlorophylle totale (D))

Chapitre 2 : Analyses des données climatiques :

2.1- Analyse statistique descriptive des températures :

La température représente un facteur limitant de toute première importance car, elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère (Ramade, 1994).

Dans le but d'avoir une information concernant la valeur centrale, la dispersion et la distribution des observations relatives aux séries des températures minimales et maximales, une statistique descriptive a été adoptée. La moyenne (Moy) l'écart type (S), l'erreur standard (ES) et le coefficient de variation (CV) ont été calculés pour les 12 mois.

2.1.1- Les températures minimales:

L'étude statistique descriptive des températures minimales a donné les résultats suivants :

Tab.16 : Résultats de l'étude statistique descriptive des températures minimales de la région de Sétif (période 2005-2007)

Année		Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov
2005	Moy	2,855	-0,748	-0,475	5,587	7,593	13,045	17,040	20,719	18,629	14,841	11,987	5,730
	S	3,389	3,146	2,449	4,984	4,491	3,619	3,707	3,810	4,547	2,843	1,985	3,993
	CV	118,717	-420,412	-515,543	89,200	59,150	27,746	21,755	18,390	24,411	19,156	16,559	69,694
	ES	11,297	10,488	9,070	16,612	15,488	12,065	12,783	12,701	15,158	10,153	6,616	13,771
	Mini	-4,2	-9,5	-6,1	-3,1	-0,1	4,5	8,4	14,8	11,5	10,1	8,2	-2,5
	Maxi	8,3	3,9	3,9	14,8	16,5	19,2	22,8	27,5	28,2	21,4	16,5	13,8
2006	Moy	1,868	0,700	0,932	5,039	9,807	14,600	17,817	20,316	18,394	14,850	13,613	7,067
	S	2,478	2,152	1,696	3,946	3,750	3,520	6,752	2,160	2,800	3,371	2,846	2,268
	CV	132,700	307,436	181,944	78,319	38,244	24,112	37,899	10,632	15,221	22,698	20,906	32,094
	ES	8,262	7,174	6,281	13,154	12,933	11,735	23,284	7,200	9,333	11,623	9,486	7,821
	Mini	-2,400	-2,900	-1,700	-1,900	3,200	9,600	2,500	15,700	11,400	7,800	7,700	2,100
	Maxi	6,9	5,6	3,8	13,2	16,8	21,1	26,3	25	24,2	20	19,3	12,2
2007	Moy	3,584	3,232	3,786	3,711	8,367	11,058	17,407	19,719	20,187	15,363	11,655	4,687
	S	2,019	2,404	1,753	3,854	2,698	4,302	5,179	2,781	2,478	2,574	4,054	2,664
	CV	56,348	74,378	46,312	103,865	32,242	38,907	29,753	14,105	12,277	16,757	34,781	56,840
	ES	6,731	8,014	6,493	14,275	9,302	14,341	17,859	9,271	8,261	8,877	13,512	9,186
	Mini	0,1	-1,2	1	-3,4	1,8	4,8	7	12,9	15,6	10,2	5,8	-2
	Maxi	8,1	8,6	7,4	12	13,1	19	25,8	23,7	23,7	20,6	19,8	10,3

Le tableau 16 montre que :

- La moyenne des températures minimales varie de -0.47°C à 3.78°C pendant la saison hivernale, et de 17.04°C à 20.71°C pendant la saison estivale. On constate aussi une forte différence entre les minima et les maxima relevés pour le même mois qui peut atteindre une amplitude comprise entre 5 et 23°C .

- Les valeurs de l'écart type sont très faibles, cela signifie qu'elles sont assez concentrées autour de la moyenne.

- Les valeurs du coefficient de variation sont très élevées pour la saison hivernale ce qui montre l'intensité de la variabilité des températures minimales durant cette saison. Donc, on peut dire que la dispersion autour de la moyenne est grande et que les données sont hétérogènes. Quant à la saison estivale, les valeurs du coefficient de variation deviennent très petites suite à la désaisonnalisation des mois, ce qui signifie que l'irrégularité de la température minimale est faible.

2.1.2- Les températures maximales :

Tab.17 : Résultats de l'étude statistique descriptive des températures maximales de la région de Sétif (période 2005-2007).

Année		Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov
2005	Moy	9,252	8,203	6,750	15,239	17,597	26,910	30,357	35,094	31,787	26,531	22,529	14,510
	S	3,941	4,973	3,792	5,987	5,859	3,759	4,047	3,684	4,319	3,785	2,312	5,570
	CV	42,600	60,620	56,178	39,289	33,299	13,968	13,332	10,498	13,587	14,266	10,261	38,389
	ES	13,137	16,576	14,045	19,957	20,205	12,529	13,955	12,280	14,396	13,518	7,705	19,208
	Mini	2,7	-2,3	0,7	2,1	4,2	15,6	22,9	27,3	24,7	17,7	18,6	5,8
	Maxi	17,8	13,8	15,6	23,6	26,4	30,9	36,8	40,3	39,6	32,7	27,6	25
2006	Moy	8,623	7,590	9,314	15,861	20,910	25,703	30,703	33,445	32,306	26,200	24,784	16,527
	S	2,603	2,192	3,016	5,360	4,138	5,192	6,312	2,490	3,596	3,957	3,831	2,713
	CV	30,192	28,885	32,381	33,793	19,790	20,199	20,558	7,444	11,131	15,102	15,459	16,414
	ES	8,678	7,308	11,171	17,867	14,269	17,306	21,765	8,299	11,987	13,644	12,772	9,354
	Mini	3,500	3,000	5,200	4,000	13,500	15,800	15,000	26,600	22,300	17,400	17,300	12,400
	Maxi	13,6	12,3	14,7	25,3	27,5	32,8	38,5	37,8	37,8	31,3	32	23,9
2007	Moy	10,555	13,490	12,504	12,496	16,417	22,503	30,780	33,655	33,277	27,440	20,526	13,703
	S	2,649	3,460	3,433	5,832	2,938	5,276	6,129	2,616	2,343	3,352	5,021	3,209
	CV	25,101	25,645	27,456	46,670	17,895	23,446	19,911	7,773	7,040	12,217	24,462	23,415
	ES	8,831	11,532	12,715	21,600	10,130	17,587	21,133	8,719	7,809	11,560	16,737	11,064
	Mini	5,8	6,5	5,3	2,7	10,3	14,3	15,7	27,2	26,9	20,3	10,4	7
	Maxi	16,3	21	18,9	23,7	21,8	31,4	38,2	37,2	37,2	32,8	31,6	20,6

D'après le tableau 17 on remarque que :

- La moyenne des températures maximales varie de 6.75°C à 13.49°C pendant la saison hivernale, et de 30.35°C à 35.09°C pendant la saison estivale.

- Les températures maximales enregistrées pendant la saison estivale de ces trois dernières années varient de 36.8 à 40.3°C alors que les minima de la saison hivernale sont toujours inférieurs à 7°C.

- La différence entre les valeurs extrêmes varie de 9.3°C à 16.1°C pour la saison hivernale et 10°C à 23.5°C pour la saison estivale.

- Les valeurs de l'écart type sont très faibles, cela signifie qu'elles sont assez concentrées autour de la moyenne.

- Les coefficients de variation sont plus importants pour les données de la saison hivernale, nettement supérieure à 25 %, pouvant même atteindre 60 % dans certains cas (donc l'écart type vaut 60 % de la moyenne), ce qui indique l'irrégularité et l'hétérogénéité de la température maximale.

- Pour la saison estivale, le coefficient de variation correspondant au niveau bas est particulièrement faible, ce qui signifie que l'irrégularité de la température maximale est faible et que les données sont homogènes et groupées autour de la moyenne.

2.2- Tendances thermiques des saisons :

Notre travail traite les deux saisons hivernale et estivale sur une période de 7 ans (2001-2007), afin de connaître la variabilité des températures extrêmes et leurs effets sur la survie des semis de pin d'Alep dans la région de Sétif.

L'hiver a été défini comme la période de Décembre de l'année n-1 à Février de l'année n (DJF); l'été intègre les mois de Juin à Août (JJA).

2.2.1- Evolution des températures minimales de la saison hivernale pour la période 2001-2007 :

La figure 41 montre la variabilité des températures minimales de la saison hivernale pour une période de 7 ans (2001-2007). La droite sur le graphe désigne la tendance de l'évolution des températures minimales.

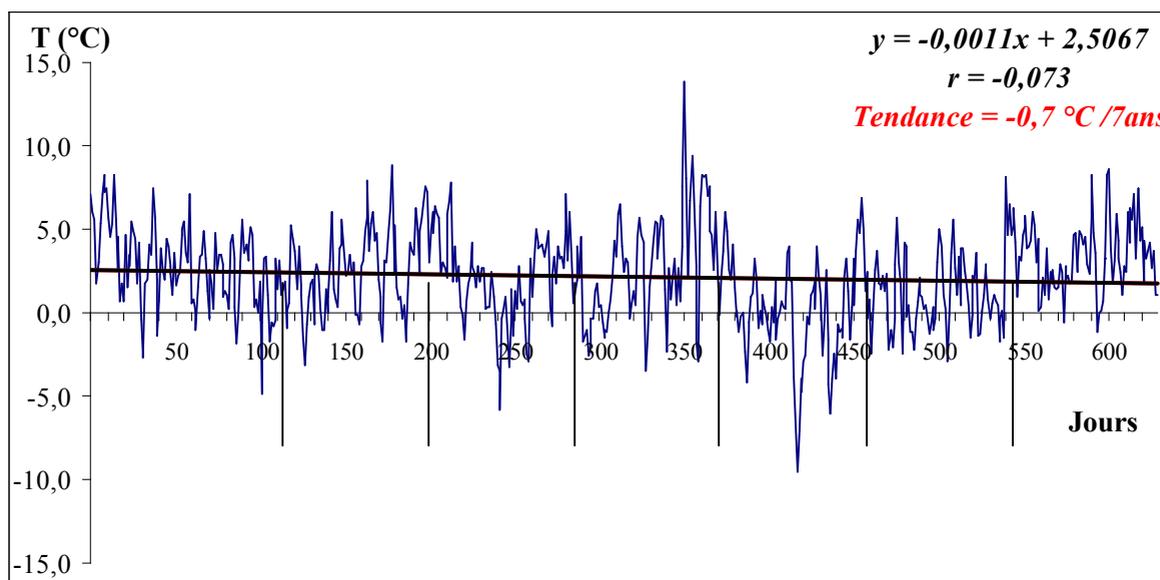


Fig.41: Evolution des températures minimales de la saison hivernales pour la période 2001-2007

Pour la période considérée, on constate une forte variation des températures minimales, allant de $-9,5^{\circ}\text{C}$ à plus de 13°C (Fig.41). Le refroidissement est légèrement plus marqué en période hivernale où les températures minimales diminuent globalement de $0,706^{\circ}\text{C}$ en 7 ans (soit une tendance de $-0,1^{\circ}\text{C}/\text{saison}$). Cette diminution semble liée à l'année 2005, plutôt plus froide et marquée par une abondance des valeurs négatives durant la saison hivernale.

On constate aussi que des températures extrêmement froides (-10°C) ont été mesurées durant la saison hivernale de l'année 2005 et considérée comme la plus froide.

2.2.2- Evolution des températures maximales de la saison estivale pour la période 2001-2007 :

Le graphe ci-dessous représente l'évolution des températures maximales de la saison estivale de la période 2001-2007.

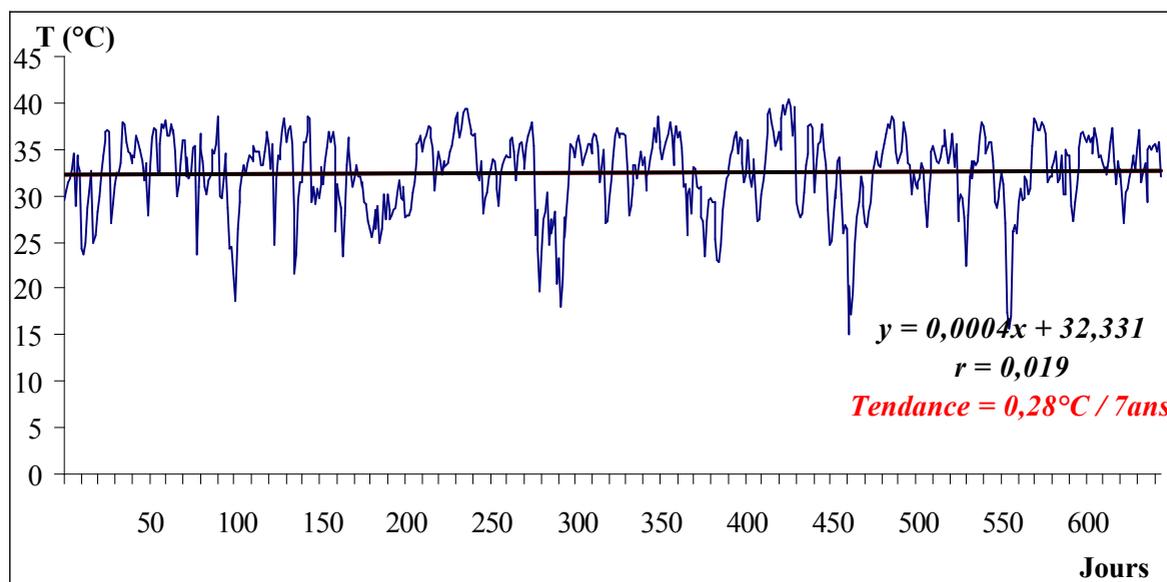


Fig.42: Evolution des températures maximales de la saison estivale pour la période 2001-2007

D'après cette figure, on constate une forte variation de la température maximale, allant de 15°C à plus de 40°C. Le réchauffement est légèrement plus marqué en période estivale où les températures de la région de Sétif gagnent globalement 0.28°C en 7ans (2001-2007) (soit une tendance de 0.04°C/saison de l'année). Cette augmentation des maximums est due en partie à l'été chaud de l'année 2007.

2.3- Stress enregistrés durant les trois années (2005, 2006 et 2007) :

Pour la période s'étendant de 1998 à 2007, nous avons calculé la moyenne des maxima du mois le plus chaud ($M=34^{\circ}\text{C}$) et la moyenne des minima du mois le plus froid ($m = 2^{\circ}\text{C}$) pour mieux définir les périodes exceptionnellement froides et exceptionnellement chaudes pour la région de Sétif. Nous remarquons que la répartition de ces stress au cours du temps peut donner une indication sur la tendance des variations thermiques pour la période considérée.

Les stress ont été définis de la manière suivante :

Pour les périodes froides, nous avons considéré qu'une température était stressante, lorsque elle est inférieure à « **m** » c'est-à-dire $< 2^{\circ}\text{C}$. Quant aux périodes chaudes, on considère que le stress est présent si la température dépasse le seuil de $M = 34^{\circ}\text{C}$.

2.3.1- Les températures fraîches inférieures à $m = 2^{\circ}\text{C}$:

Nous avons choisi les paramètres suivants :

- **La date du stress**
- **La durée du stress** (en heures).
- **Le poids** : en degrés Celsius, avec 2°C de température minimale comme référence : par exemple : une température minimale de -3.1°C aura un poids de : $2^{\circ}\text{C} - (-3.1^{\circ}\text{C}) = 5.1^{\circ}\text{C}$.
On fait la somme de ces valeurs pour toute la durée de stress.
- **L'intensité du stress** : (en degrés Celsius/heure), c'est le poids par rapport à la durée : des périodes de froids peuvent être longues et modérées, d'autres courtes mais intenses. Ce paramètre nous permettra d'avoir un indicateur intéressant à ce niveau (Annexe1, Tab.4, 5 et 6).

Toutes ces données ont été reprises dans le graphique suivant :

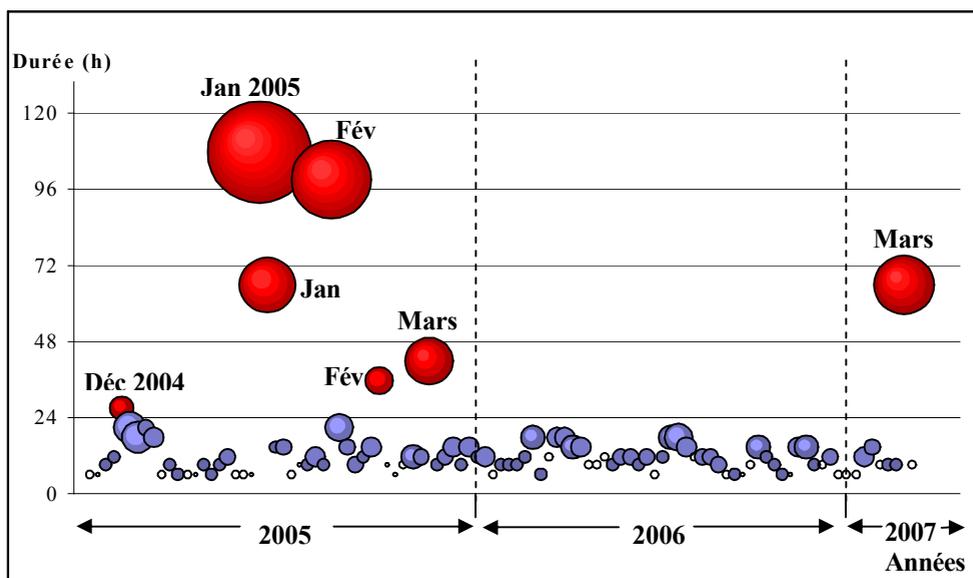


Fig.43: Stress de froid enregistrées durant la période 2005-2007 dans la région de Sétif

La taille des sphères est proportionnelle au poids de stress : plus les sphères sont petites plus le poids de stress est faible.

Sept de ces périodes de stress ont une durée supérieure à 24 heures (une journée) : elles sont en rouge sur le graphique, avec une indication du mois correspondant.

D'après la figure 43, nous pouvons déjà faire quelques remarques :

1- Les périodes de refroidissement (du 25 au 29 janvier 2005 et du 14 février au 18 Février 2005) sont tout à fait exceptionnelles par les durées et les poids. Avec des durées qui dépassent 99 heures, elles sont bien loin devant tous les autres stress (Annexe 1 ; Tab.4).

2- Malgré la durée des stress enregistrées du 25 à 26 Décembre 2004 et du 27 à 29 Février 2005 qui est supérieure à 24 heures, elles furent peu intenses, ce qui montre que leur poids sont relativement faibles (Annexe 1 ; Tab.4).

3- Les périodes de refroidissement les plus intenses se regroupent souvent dans l'année 2005 : durant le mois de Janvier et dans une moindre mesure pour: Décembre et Février 2005.

4- Tous les autres stress de froid ont une période comprise entre 6 et 21 heures consécutifs (sphères de faible diamètre) (Fig.43).

2.3.1.1- Stress enregistrés durant la période (2005-2007) où les basses températures inférieures à 2°C ont durée plus de 24 heures :

La figure 44 représente bien la chronologie des températures tri-horaires des sept périodes où les basses températures inférieures à 2°C ont durée plus de 24heures (plus d'une journée).

Il faut noter qu'au dessous de la ligne thermique ($m=2^{\circ}\text{C}$), les températures enregistrées sont considérées comme stressantes.

a)- Stress de Décembre 2004 (du 25/12/2004 au 26/12/2004) :

Durant ce mois, la période de refroidissement a duré 27 heures, avec des températures qui varient entre $[2\ 0^{\circ}\text{C}]$ (Fig.44a). Malgré sa durée, cette période fut peu intense ($0.40\text{C}^{\circ}/\text{heures}$) ce qui explique son poids relativement faible ($10,7\text{C}^{\circ}$) (Annexe1 ; Tab.4).

b)- Stress de Janvier 2005 (du 25/01/2005 au 29/01/2005) :

La chronologie des températures tri-horaire de cette période (Fig.44b), permet de distinguer un stress assez long et remarquable avec une durée de 108 heures successives, où les températures tri-horaires sont restées quatre journées successives au-dessous de 0°C .

c)- Stress de Janvier 2005 (du 29/01/2005 au 01/02/2005) :

Entre la fin du Janvier et le 1^{er} jour du mois de Février, on remarque un stress de 66heures successives provoqué par des températures comprises entre $[2 - 4^{\circ}\text{C}]$ (Fig.44c).

d)- Stress de Février 2005 (du 14/02/2005 au 18/02/2005) :

Le stress de cette période est assez long, enregistré entre le 14^{ème} et le 18^{ème} jour du mois de Février, où les températures tri-horaires sont restées 99 heures successives (plus de 4 journées) inférieures à 2°C . (Fig.44d).

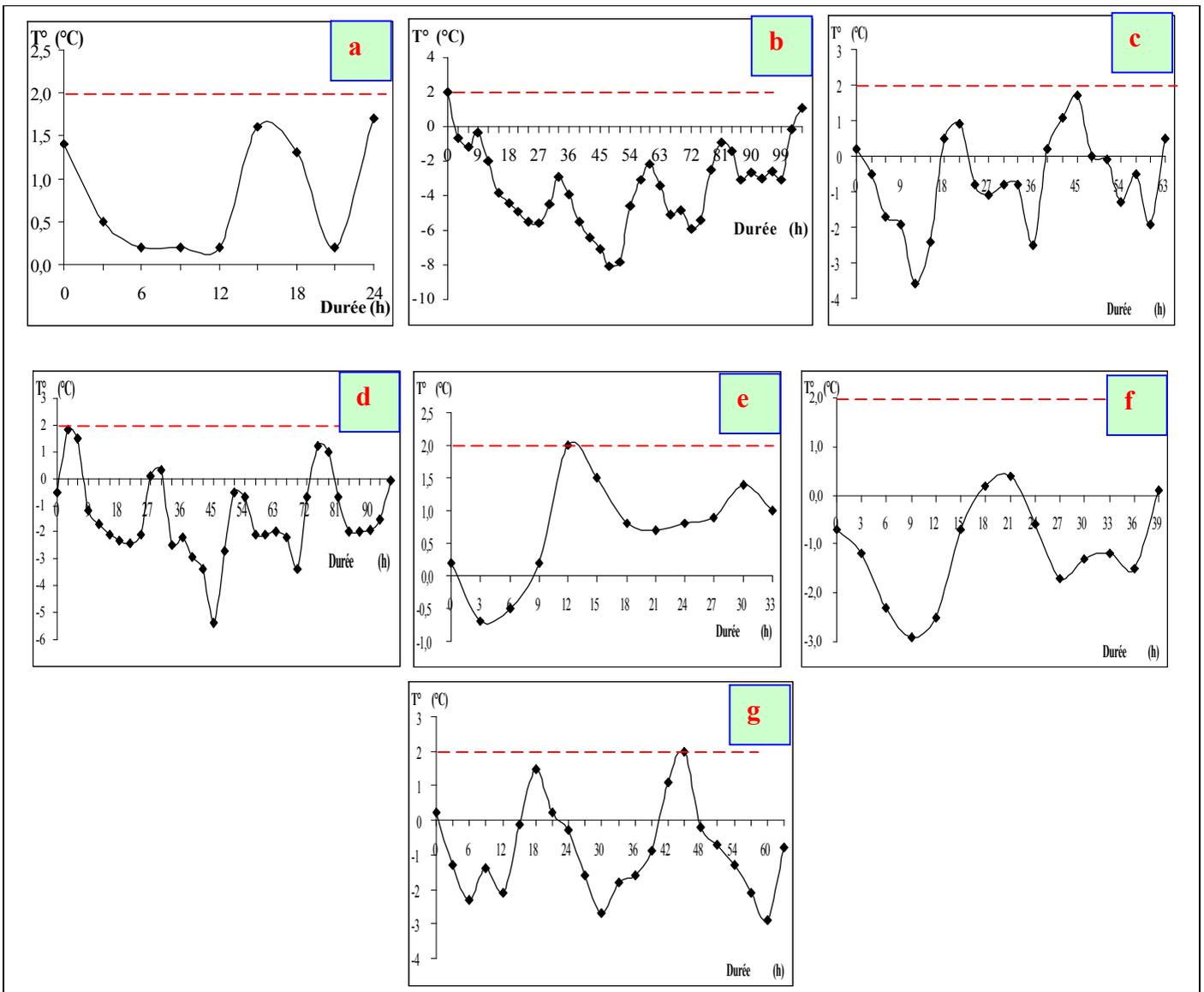


Fig.44 : Cinétique des températures tri-horaires des périodes où les basses températures (inférieures à 2°C) ont durée plus de 24 heures

e)- Stress de Février 2005 (du 27/02/2005 au 29/02/2005) :

La chronologie des températures tri-horaire de cette période (Fig.44e), permet de distinguer un stress remarquable où les températures tri-horaires ont duré 36 heures successives.

f)- Stress de Mars 2005 (du 7/03/2005 au 9/03/2005) :

Comme on peut le constater sur le graphique 44f de l'évolution des températures tri-horaires de la période 7/03/2005-09/03/2005, le stress est marqué par des températures fréquemment inférieures à 0°C.

g)- Stress de Mars 2007 (du 21/03/2007 au 24/03/2007) :

Un long stress est enregistré durant ce mois, entre le 21^{ème} et le 24^{ème} jours du mois (Fig.44g), où les températures comprises entre [2 -4°C] ont duré 66 heures successives.

2.3.2- Les températures chaudes supérieures à M=34°C :

Pour les hautes températures le poids du stress est exprimé en degrés/heure, avec 34°C de température maximale comme référence : une température maximale de 36°C aura un poids de : $36^{\circ}\text{C}-(34^{\circ}\text{C})= 2^{\circ}\text{C}$. On fait la somme de ces valeurs pour toute la période de stress (annexe1 Tab.7, 8 et 9).

Le graphe ci –dessous montre les principaux stress de chaleur enregistrée durant les trois années 2005,2006 et 2007.

Le diamètre des sphères est proportionnel au poids de la période de réchauffement : plus les bulles sont petites plus le poids de la période de chaleur est faible et vice versa. Les sphères rouges correspondent aux périodes de stress ayant une durée de 12 heures (une demi-journée).

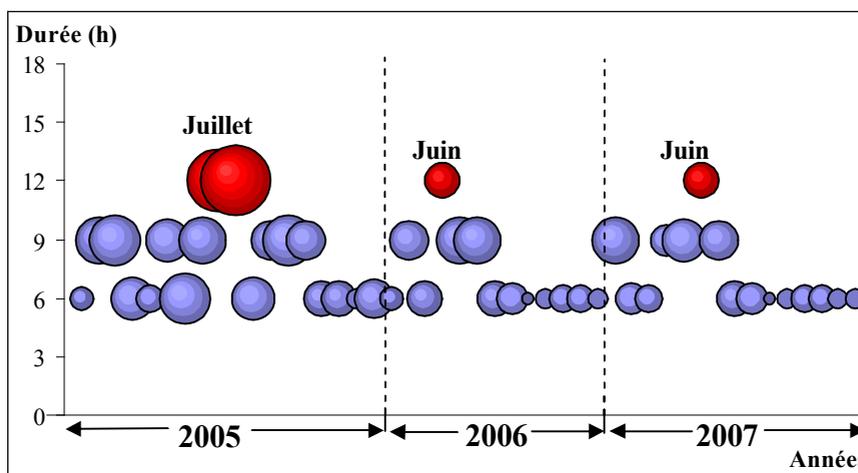


Fig.45 : Stress de chaleur enregistrés durant la période 2005-2007 dans la région de Sétif

Sur la base du graphique, on remarque que:

- 1- Quatre périodes de réchauffement ont une durée supérieure à 12 heures.
- 2- Les périodes de chaleur les plus importantes (avec un intensité d'au moins 1°C/heure), se sont produites essentiellement durant le mois de Juillet 2005 (Annexe 1 ; Tab.7).
- 3- Malgré les durée de la période de réchauffement de Juin 2006 et 2007 sont importantes (12heures), ces périodes de réchauffement furent peu intenses, ce qui explique que ces poids sont relativement faibles (Annexe 1 ; Tab.8 et 9).
- 3- Tous les autres stress de chaleur remarquables avaient une période comprise entre 6 et 9 heures consécutifs (Fig.45).

2.3.2.1- Stress enregistrés durant la période (2005-2007) où les hautes températures supérieures à 34°C ont durée plus de 12heures :

La figure 46 représente la cinétique des températures tri-horaires des quatre stress enregistrés où les hautes températures supérieures à 34°C ont durée plus de 12heures (demi-journée). On note aussi que la ligne rouge discontinue (M=34) représente un seuil au delà duquel les températures successives placées au dessus sont considérés comme des stress thermique par la chaleur.

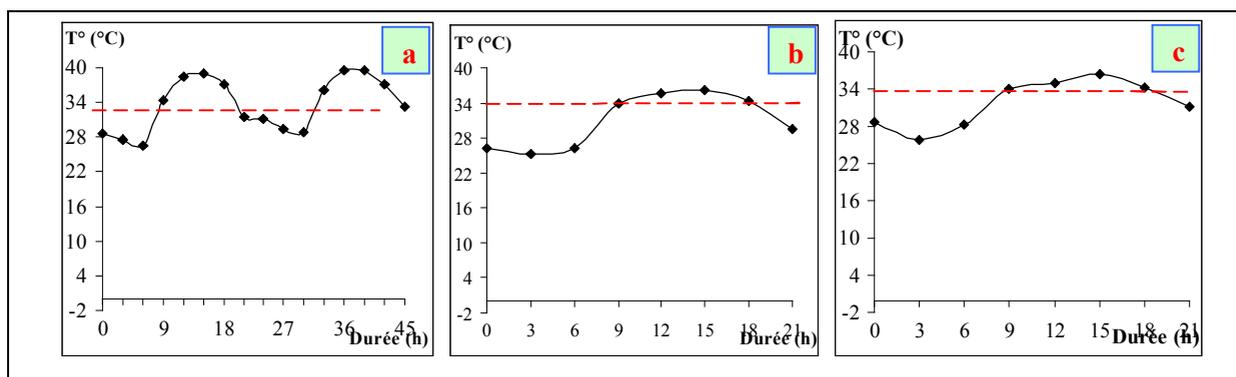


Fig.46 : Cinétique des températures tri-horaires des périodes où les hautes températures supérieures à 34°C ont duré plus de 12 heures

a)- Les deux stress de Juillet 2005 (le 27/07/2005 et 28/07/2005) :

La chronologie des températures tri-horaire de ces deux jours (Fig.46a), permet de distinguer 2 stress longs et remarquables avec une durée de 12 heures successives durant le 27^{ème} et le 28^{ème} jour du mois de Juillet, où les températures sont restées une demi-journée au-dessus de 34°C.

b)- Stress de Juin 2006 (le 26/06/2006) :

La figure 46b montre le réchauffement enregistré durant le 26^{ème} jour du mois de Juin 2006, où les températures tri-horaires ont durées 12 heures où la température est supérieure à 34°C.

c)- Stress de Juin 2007 (le 24/06/2007) :

Durant ce mois, la période de réchauffement a duré 12 heures, avec des températures qui varient entre (34 -37°C) (Fig.46c). Malgré sa durée, cette période fut peu intense (0.32C°/heures), ce qui explique son poids relativement faible (3.8C°).

2.4- Conditions climatiques de l'année expérimentale (2007-2008) :

2.4.1- Pluviosité :

Les valeurs de pluviosité relevées par le pluviomètre sont présentées dans la figure 47 sous la forme de précipitations cumulées.

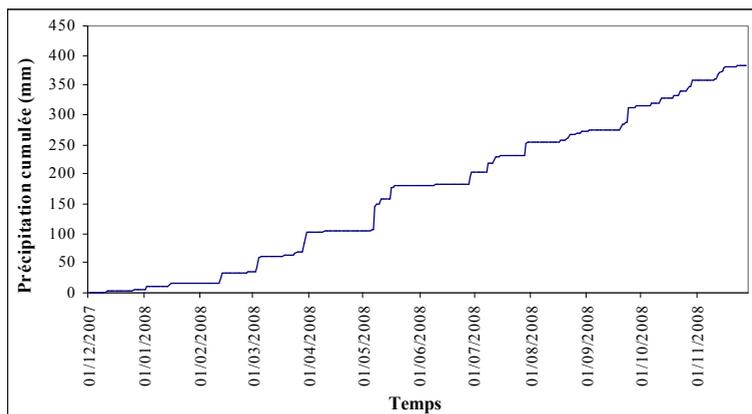


Fig.47 : Précipitations cumulées de la région de Sétif durant l'année expérimentale 2007-2008

La courbe des précipitations permet de mettre en évidence, les périodes sèches et les épisodes pluvieux. Le découpage saisonnier des valeurs de flux de précipitation (Tab.18) ne permet pas de pointer une réelle différence entre les saisons. De même, le nombre de jours pluvieux n'affiche pas de différences saisonnières marquées.

Tab.18 : Comparaison des valeurs saisonnières de précipitations (mm) et du nombre de jours pluvieux de l'année 2007-2008

Saisons	Hiver	Printemps	Été	Automne
Hauteur (mm)	35.3	146	89.5	114
Nombre de jours	16	19	15	31

Les données de la station météorologique, concernant la région de Sétif sur la période 1998-2007, fournissent une valeur annuelle de 405.41 mm. Alors que la pluviosité annuelle de l'année expérimentale (2007-2008) est de 384.8 mm, donc l'année étudiée semble donc être la plus sèche.

2.4.2- Les températures :

Dans cette partie on a essayé de comparer les températures moyennes mensuelles enregistrées durant l'année expérimentale (2007-2008) avec celles de la période décadaire (1998-2007) pour distinguer les écarts et les tendances mensuelles et saisonnières des températures.

Il convient de préciser qu'en terme de valeurs dites « normales », l'échelle de référence utilisée a été basée sur la période décadaire 1998-2007 étant pressentie comme l'année précédant la période de l'expérimentation (2007-2008) dans notre région.

Tab.19: Températures moyennes de l'année expérimentale (2007-2008) et de la période 1998-2007 de la station de Sétif

	Températures moyennes (°C)		Ecart à la normale (°C)
	L'année expérimentale 2007- 2008	Période (1998-2007)	
Décembre	5,89	6,48	-0,59
Janvier	7,04	5,95	1,09
Février	8,20	6,74	1,46
Mars	9,00	10,34	-1,34
Avril	13,40	13,24	0,16
Mai	17,82	18,33	-0,51
Juin	21,78	24,06	-2,28
Juillet	27,72	27,39	0,33
Août	26,94	26,75	0,20
Septembre	21,65	21,54	0,11
Octobre	15,65	17,56	-1,91
Novembre	8,65	10,17	-1,52
Hiver	7,04	6,39	0,65
Printemps	13,41	13,97	-0,56
Été	25,48	26,07	-0,59
Automne	15,32	16,42	-1,11
Année	15,31	15,71	-0,40

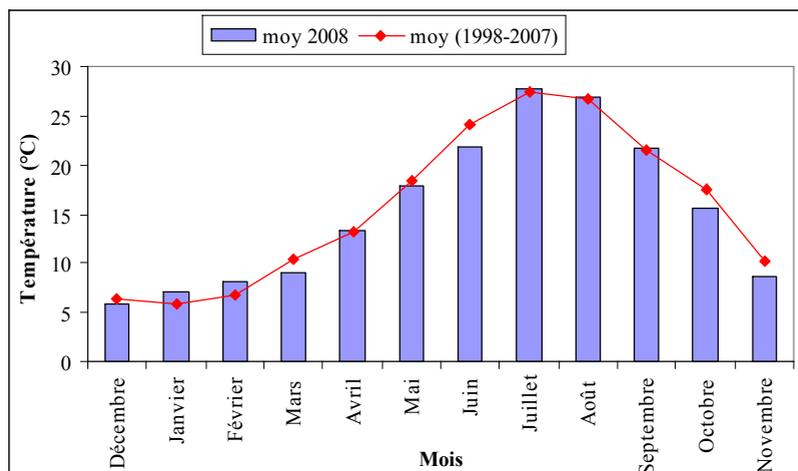


Fig.48: Températures moyennes mensuelles de l'année expérimentale (2007-2008) et pour la période (1998-2007) de la région de Sétif

a) -La saison hivernale :

Le début de l'hiver 2007-2008 fut caractérisé par un mois de Décembre conforme aux normales saisonnières, voire légèrement plus frais (5.89°C au lieu de 6.48°C). Le mois de Janvier 2008 présente une situation encore moins fréquente avec 7.04°C de température moyenne observée alors que la normale n'est que de 5.95°C . Le mois de Février 2008 fut caractérisé par une température moyenne supérieurs de $+1.46^{\circ}\text{C}$ par rapport à la normale (Tab.19, Fig.48).

L'hiver, dans l'ensemble, a été légèrement moins frais que la normale (7.04°C au lieu de 6.39°C) et ce avec une certaine homogénéité tout au long de la saison (Tab.19, Fig.49).

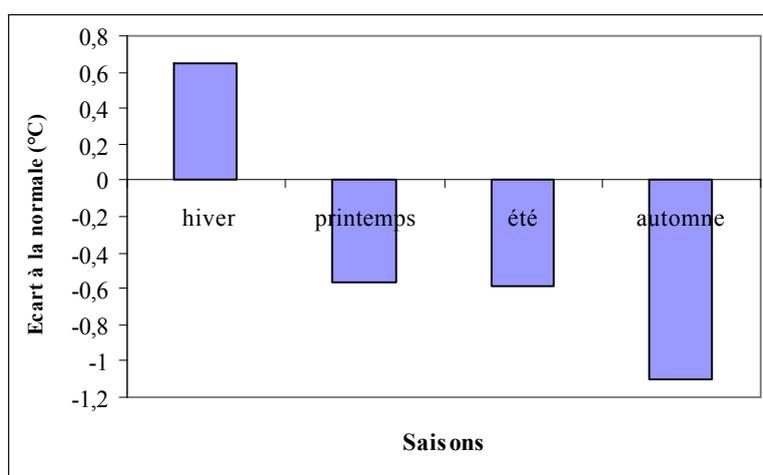


Fig.49 : Ecart à la normale des températures moyennes saisonnières de l'année expérimentale (2007-2008)

b)- La saison printanière :

Le printemps 2008 a débuté par un mois de mars contrasté avec une période plus fraîche que la normale. La température moyenne de ce mois a été de 9°C, soit inférieure de -1.34°C par rapport à la normale. En revanche, avril fut un mois proche de la normale (écart de 0.16°C). Enfin, le mois de Mai fut légèrement frais avec un écart négatif de -0.51°C par rapport à la normale (Tab.53, Fig.48).

Un mois de Mars frais suivi par un mois d'Avril normal précédant un mois de Mai dans l'ensemble légèrement frais ont doté le printemps 2008 d'une température moyenne à peine inférieure aux normales saisonnières (13.41 °C au lieu de 13.97°C) (Tab.19, Fig.49).

c)- La saison estivale :

Le mois de Juin 2008 fut caractérisé par une température moyenne diminuée de -2.28°C par rapport à la normale (Tab.19, Fig.48). Hormis cette période particulièrement douce, le mois de juillet a connu des températures proches de la normale. Sur l'ensemble du mois, la température moyenne a été de 27.72°C contre 27.39°C pour la normale. Ainsi, le mois d'Août fut caractérisé par des températures proches aux normales saisonnières (soit un écart de 0.20°C). L'été 2008 fut marqué par deux phases de température proches de la normale (juillet et août) et par un mois de juin assez frais.

D'une manière générale, les températures de l'été 2008 se sont distinguées par un écart négative de - 0.59°C par rapport à la normale (Tab.19, Fig.49).

d)-La saison automnale :

Le mois de Septembre a connu des températures proches de la normale. Sur l'ensemble du mois, la température moyenne a été de 21.65°C contre 21.54°C pour la normale. Cependant la température moyenne du mois d'octobre a été de 15.65°C, soit inférieure de -1.91°C par rapport à la normale. Un bilan équivalent peut être dressé pour le mois de Novembre où la température moyenne mensuelle de 8.65°C au lieu de 10.17°C pour la normale (Tab.19, Fig.48).

Du point de vue thermique, l'automne 2008 a connu une douceur. En effet, pour l'ensemble de la saison, la température moyenne a été de 15.32°C contre 16.42°C pour la normale (Tab.19, Fig.49).

Enfin, la température moyenne annuelle de l'année expérimentale (2007-2008) est inférieure à la température moyenne de la période 1998-2007 (15.31°C contre 15.71°C), elle reste toutefois inférieure de -0.40 °C par rapport à la période précédente (Tab.19).

2.4.3- Les températures extrêmes (minimales et maximales) :

Concernant les températures extrêmes, le minimum des moyennes mensuelles des températures minimales est enregistré en décembre (1.95°C). Alors que le maximum est observé durant le mois de juillet (20.74°C). Ainsi la température maximale la plus faible est enregistrée pendant le mois de décembre (9.81°C) et les plus élevées durant le mois de juillet (34.7°C) (Fig.50). En général, l'hiver 2007/2008 a été frais bien que les températures aient été relativement élevées en décembre et février. Cependant l'été 2008 a présenté des températures maximales plus élevées

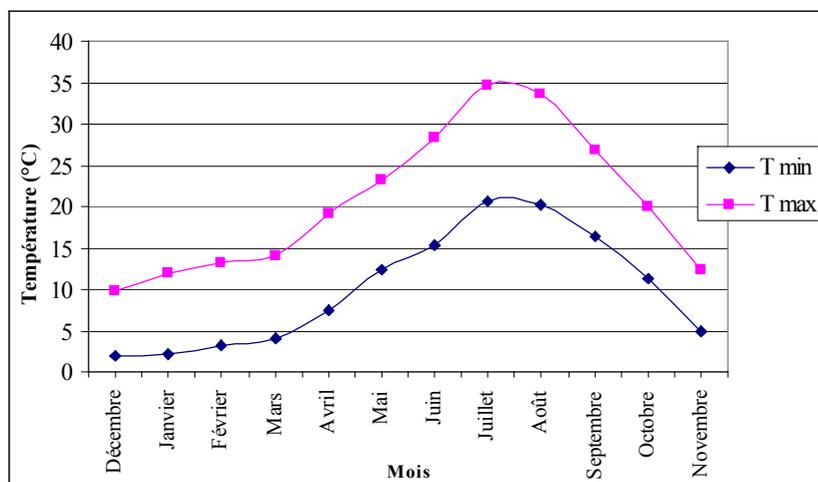


Fig.50 : Températures mensuelles minimales et maximales de la région de Sétif durant l'année expérimentale (2007-2008)

2.4.4- Traitements des températures tri horaires de l'année expérimentale (2007-2008) :

Les valeurs des températures relevées toutes les trois heures sur la région de Sétif sont présentées graphiquement ci-dessous.

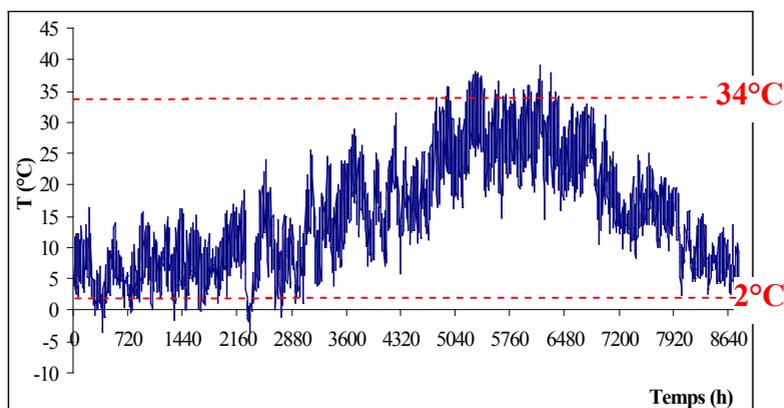


Fig.51 : Températures tri horaires de la région de Sétif durant l'année 2007-2008

Durant l'année 2007-2008, la distribution des températures suit une distribution en cloche avec un maximum observé durant le mois d'Août. La température moyenne est de 14,78°C avec un minimum de -3,6°C et un maximum de 39°C.

2.4.4.1-Durées et fréquences des températures fraîches :

La figure 52 et le tableau 20 représentent le total des fréquences et des durées des températures inférieures à 2°C pour l'année expérimentale (2007-2008).

Tab.20 : Fréquences et durées des températures fraîches inférieures à 2°C de l'année 2007-2008

Saison	Mois	(2 0)	(0 -2)	(-2 -4)	Total	
Hiver 2008	Décembre	33	7	4		
	Janvier	18	4	0		
	Février	8	2	0		
	Fréquence Totale	59	13	4		76
	Durée Totale	177	39	12		228
Printemps 2008	Mars	21	15	2		
	Avril	5	0	0		
	Mai	0	0	0		
	Fréquence Totale	26	15	2		43
	Durée Totale	78	45	6		129

Les températures inférieures à 2°C sont enregistrées pendant toute la saison hivernale (228 heures) et même pendant les deux mois (Mars et Avril) de la saison printanière (129 heures).

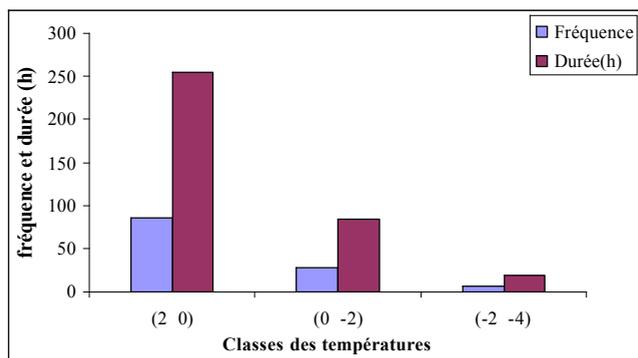


Fig.52 : Durée et fréquences des basses températures inférieures à $m = 2^{\circ}\text{C}$ de l'année 2008

On remarque plusieurs refroidissements, le premier par une fréquence de 85 fois pendant une durée totale de 255 heures durant la saison hivernale, ainsi que pour le mois de Mars et Avril de la saison printanière pour des températures comprises entre $[2\ 0^{\circ}\text{C}]$; le deuxième avec une fréquence totale de 28 fois au mois de Décembre, Janvier, Février, et Mars pour une durée totale de 84 heures pour la classe de température $[0\ -2^{\circ}\text{C}]$, le troisième par une fréquence totale de 6 fois pour une durée totale de 18 heures pour les températures comprises entre $[-2\ -4^{\circ}\text{C}]$.

2.4.4.2- Durées et fréquences des températures chaudes :

D'après le tableau n°21, la durée totale des températures chaudes supérieures à la température maximale (34°C) est de 177 heures durant l'année 2008.

Tab.21 : Fréquences et des durées des hautes températures supérieures à $M = 34^{\circ}\text{C}$ de l'année 2008

	Mois	(34 36)	(36 38)	(38 40)	Total
Eté 2008	Juin	6	0	0	
	Juillet	16	13	1	
	Août	17	5	1	
Fréquence Totale		39	18	2	59
Durée Totale		117	54	6	177

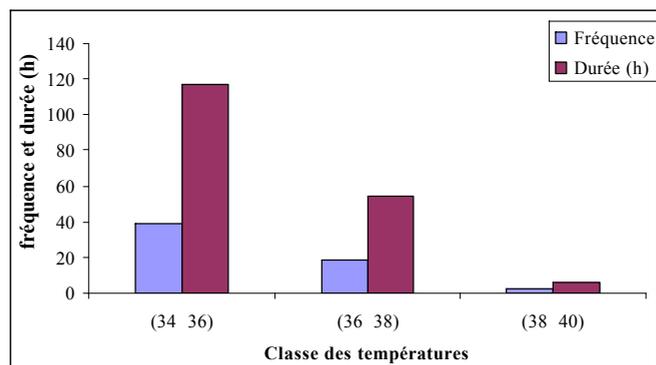


Fig.53 : Fréquence et durée des hautes températures supérieures à $M=34^{\circ}\text{C}$ de l'année 2008

On remarque durant la saison estivale de l'année 2008 trois réchauffements, le premier par une fréquence de 39 fois pendant une durée totale de 117 heures au mois de Juin, Juillet et Août pour des températures comprises entre $[34 - 36^{\circ}\text{C}]$, le second avec une fréquence totale de 18 fois pour une durée totale de 54 heures au mois de Juillet et Août pour la classe des températures $[36 - 38^{\circ}\text{C}]$, le troisième au mois de Juillet et Août avec une fréquence de 2 fois pour une durée totale de 06 heures pour la classe des températures $[38 - 40^{\circ}\text{C}]$ (Fig.53).

2.4.5- Les stress enregistrées durant l'année expérimentale (2007-2008) :

2.4.5.1- Les basses températures (inférieures à $m=2^{\circ}\text{C}$):

- La saison hivernale 2007-2008 :

Durant le mois de Décembre, la période de refroidissement a duré exceptionnellement plus de 18 jours (du 11 jusqu'à la fin du mois), où les basses températures comprises entre $[2 - 4^{\circ}\text{C}]$ ont duré 111 heures (Fig.55a, 55b). Ce mois est particulièrement marqué par un stress intense ($1.26^{\circ}\text{C}/\text{heure}$) enregistré durant le 17^{ème} jour et qui demeure 21 heures consécutives (Fig.55a) (Annexe1, Tab.10).

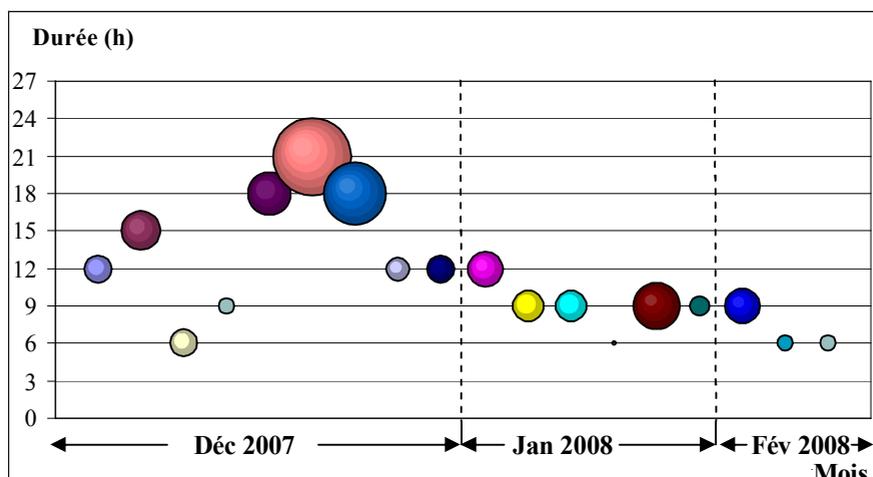


Fig.54 : Stress de froid enregistrés durant la saison hivernale de l'année 2007-2008

Pour le mois de Janvier, on remarque 6 stress, le premier et le deuxième sont observés dès le début de mois (Fig.55c), où les températures comprises entre $[2 \text{ } 0^{\circ}\text{C}]$ ont durées 21heures. Le troisième est enregistré durant le 13^{ème} jour du mois (Fig.55d), avec une durée de 09 heures successives, le quatrième stress est de faible intensité ($0.02^{\circ}\text{C}/\text{heure}$) enregistré pendant le 18^{ème} jour (Fig.55e), le cinquième stress est remarquable par son intensité maximale $0.99^{\circ}\text{C}/\text{heure}$ et son poids relativement élevé (8.9°C), il est observé durant le 25^{ème} jour du mois (Fig.55e). Le dernier stress est observé pendant le 26^{ème} jour de mois et qui a duré 09 heures (Fig.55e) (Annexe1, Tab.10).

Ainsi, le mois de Février est caractérisé par trois stress, le premier est enregistré dès le début de mois où les température comprises entre ($2 \text{ } -2^{\circ}\text{C}$) ont durée 09 heures (Fig.55f), le deuxième est observé durant le 10^{ème} jour de mois où les températures fraîches comprises entre ($2 \text{ } 0^{\circ}\text{C}$) ont durées 06 heures successives (Fig.55g), le troisième est observé pendant le 18^{ème} jours et qui dure 6 heures, avec un poids relativement faible (1.4°C) (Annexe1, Tab.10).

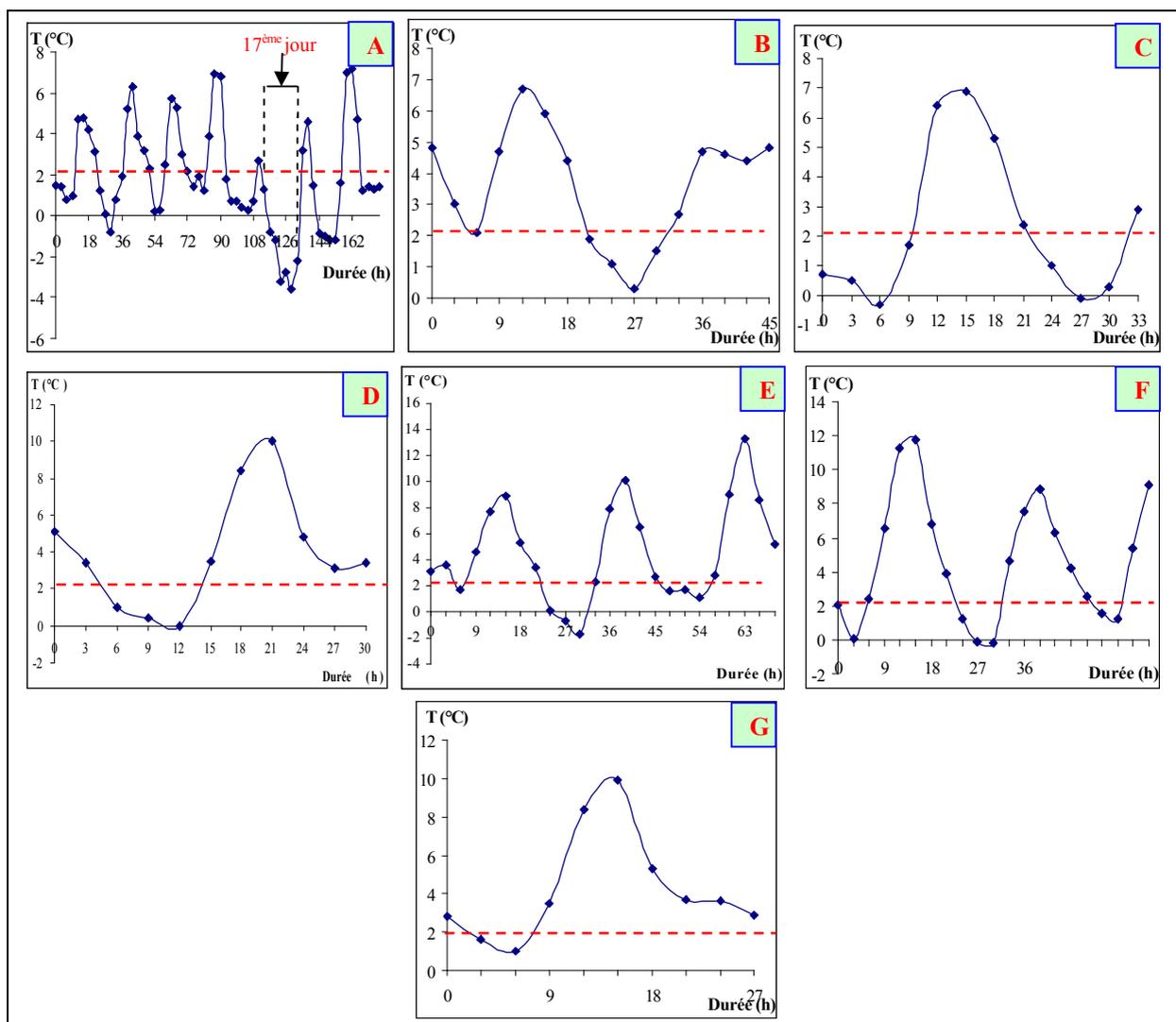


Fig.55 : Cinétique des températures fraîches de la saison hivernale de l'année 2008

- La saison printanière 2008 :

Durant la première semaine de mois de Mars, on a enregistré un stress assez long et remarquable où les températures tri-horaires sont restées trois jours successifs au-dessous de 2°C (Fig.57a). Ce stress est caractérisé par un refroidissement intense (0.71°C/heure). Un autre stress de faible intensité (0.16°C/heure) a été enregistré pendant le 9^{ème} jour du mois qui dure 12 heures (Fig.57b) (Annexe1, Tab.10).

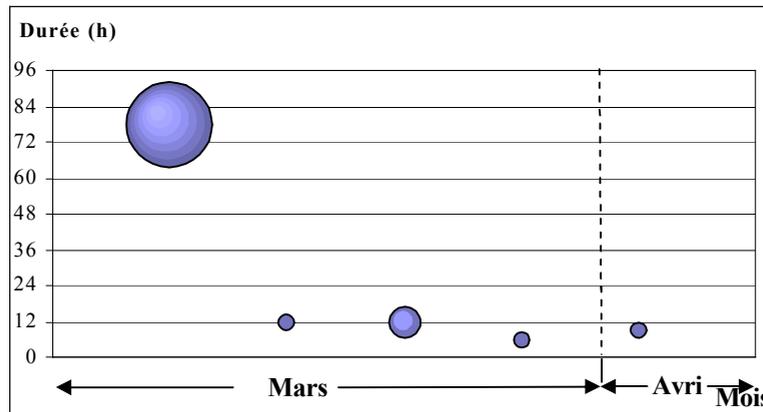


Fig.56 : Stress de froid enregistrés durant la saison printanière de l'année 2008

Ainsi vers la fin de ce mois on a enregistré deux stress de faible intensité et d'une durée totale de 18 heures (Fig.57b). Cependant le mois d'avril est caractérisé par un seul stress de faible intensité (0.22°C/heure) et qui dure 09 heures (Fig.57c) (Annexe1, Tab.10).

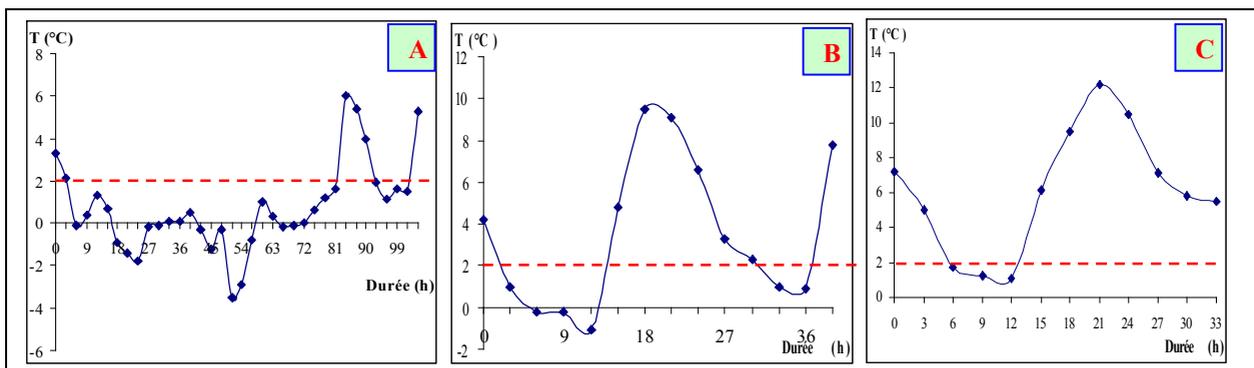


Fig.57 : Cinétique des températures fraîches de la saison printanière de l'année 2008

2.4.5.2- Les températures chaudes (supérieures à M= 34°C):

Durant le mois de Juin 2008, on a enregistré deux stress de faible intensité (pendant le 23^{ème} et le 24^{ème} jour), où les températures chaudes comprises entre 34-36°C ont durée 12 heures (2pics)(Fig.59a).

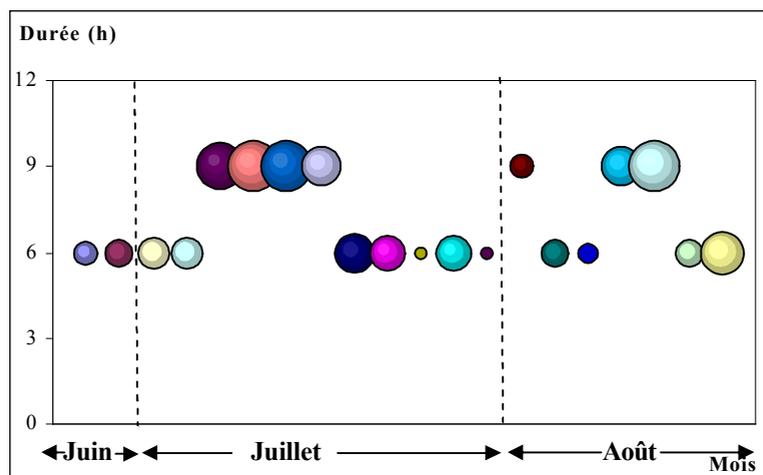


Fig.58 : Stress de chaleur enregistrés durant la saison estivale de l'année 2008

Le mois de Juillet est caractérisé par la succession des plusieurs stress avec une durée totale de 78 heures (Fig.59 b,c,d). Les périodes de chaleur les plus importantes (avec un intensité d'au moins 1°C/heure, se sont produites essentiellement durant le 8^{ème} et le 9^{ème} jour de ce mois, où les températures chaudes comprises entre (34-38°C) ont durées 09 heures pour chaque stress (Fig.59b) (Annexe1, Tab.11).

Enfin durant le mois d'Août on a enregistré 7 stress, où les températures chaudes comprises entre (34 - 40°C) ont durées 51 heures (Fig.59e,f,g). Les stress les plus intenses sont enregistrés durant le 13^{ème} et 19^{ème} jour du mois où leurs poids varient respectivement de 9.2°C à 6.5°C (Fig.59f,g) (Annexe1, Tab.11).

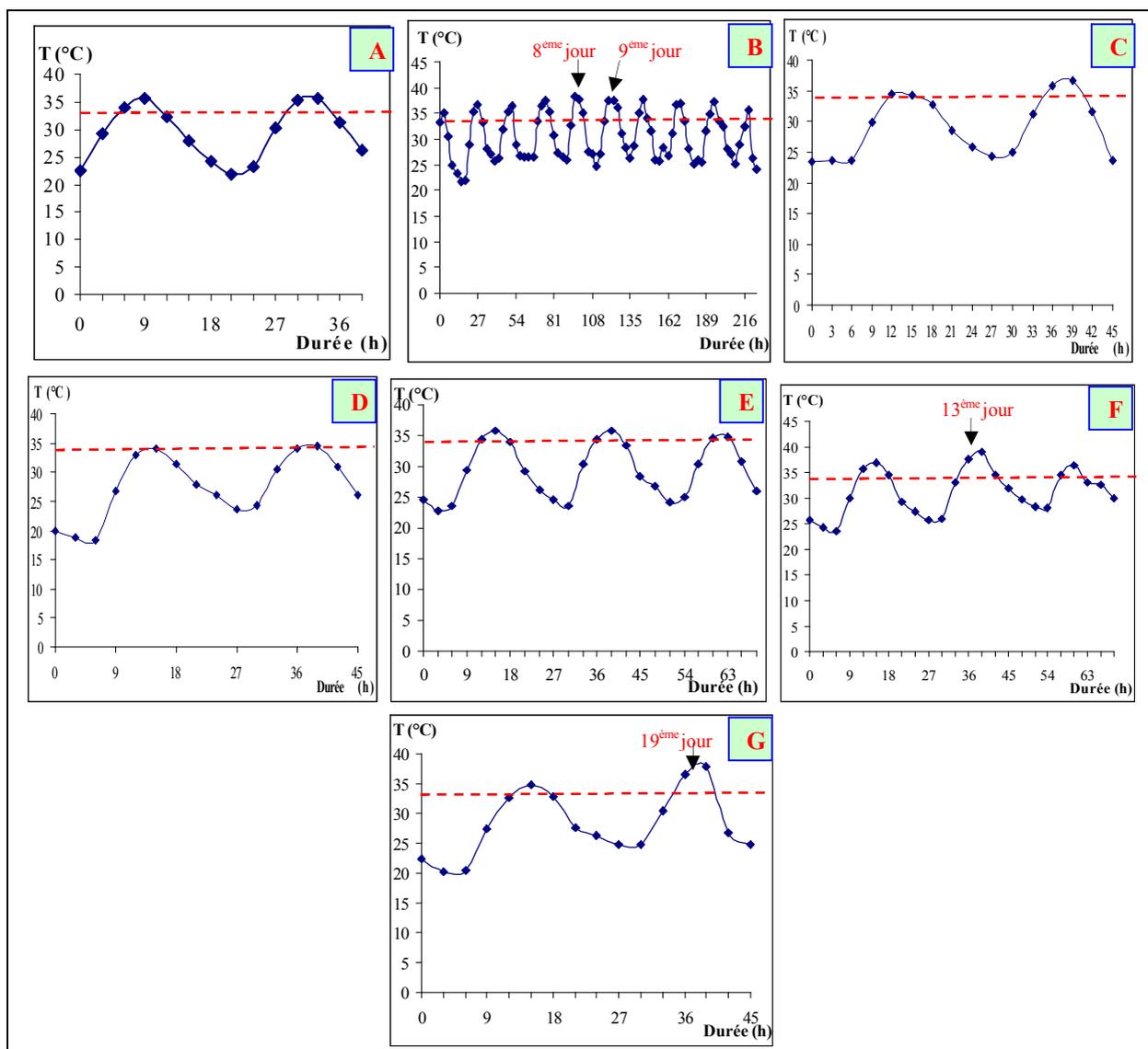


Fig.59 : Cinétique des températures chaudes de la saison estivale de l'année 2008

Chapitre 3 : Estimation des paramètres biochimiques des semis de pin d'Alep en conditions naturelles :

3.1- Proline :

a)-La saison hivernale :

Après un stress de 228 heures enregistrées durant cette saison dont la température est compris entre +2 et -4 °C, on remarque une accumulation de la proline au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep (Fig.60). Les teneurs les plus élevées sont enregistrées au niveau des jeunes pousses (3.934±0.608 $\mu\text{mol/mg MS}$) avec un plus fort gain de +1099.39% par rapport au témoin. La valeur la plus faible est enregistrée au niveau des racines (1.525± 0.128 $\mu\text{mol/mg MS}$) mais avec un gain de 500.39% par rapport au témoin (Annexe3 ; Tab.1 et 2). Donc on constate que la saison hivernale dans sa globalité a induit une augmentation des teneurs en proline dans les différents organes testées.

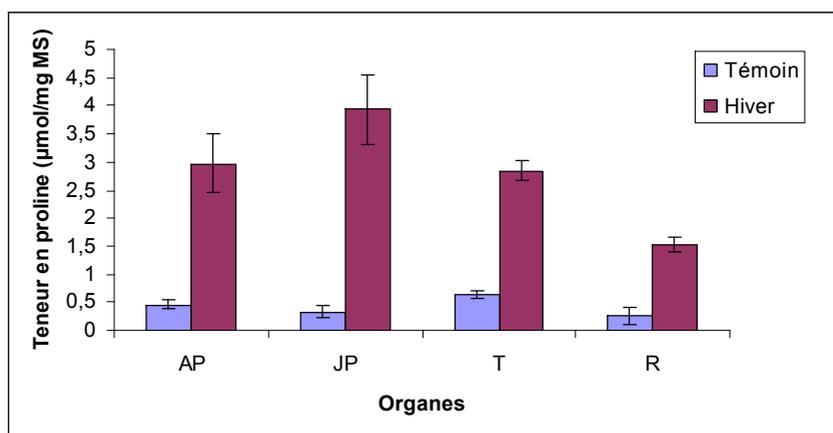


Fig.60 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison hivernale de l'année 2007-2008

Pour le facteur organe, l'analyse de la variance fait ressortir une différence très hautement significative entre les organes ($p=0.001$) (Annexe 5; Tab.1). On peut conclure donc que les organes se distinguent significativement par un taux d'accumulation de la proline. Le test de Newman-keuls au seuil de 5% donne trois groupes homogènes, le premier (A) correspond aux aiguilles des jeunes pousses qui marquent la moyenne la plus élevée (3.934 $\mu\text{mol/mg MS}$), le second (B) comprend les aiguilles des anciennes pousses et les tiges, alors que les racines occupent le dernier groupe (C) et affichent la plus faible moyenne (1.525 $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 5; Tab.7).

b)-La saison printanière :

Pour la saison printanière, la teneur en proline est variable, elle passe de 1.681 ± 0.207 $\mu\text{mol/mg MS}$ au niveau des racines à 2.923 ± 0.232 $\mu\text{mol/mg MS}$ au niveau des aiguilles des jeunes pousses (Fig.61). Le test de l'analyse de la variance à un critère de classification montre une différence hautement significative entre les organes ($p=0.002$) (Annexe 5; Tab.1).

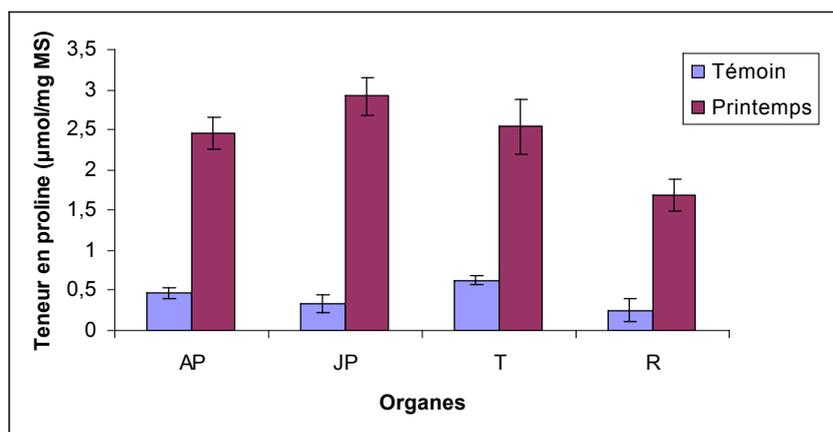


Fig.61 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison printanière de l'année 2008

La comparaison des moyennes réalisées par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5%, donne deux groupes distincts, où on note que le premier groupe (A) englobe les aiguilles des deux pousses avec les tiges, le deuxième groupe (B) correspond au racines avec une faible moyenne ($1,681$ $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 5; Tab.7).

c)-La saison estivale :

D'après la figure1, on peut dire que les périodes de réchauffement enregistrées durant la saison estivale ont induit une très grande accumulation de la proline. Les résultats obtenus montrent une accumulation importante au niveau des différents organes par rapport au témoin (soit une augmentation de +936.24% pour les tiges, +1147.63% pour les racines, +1232.31% pour les anciennes pousses et +1368.59% pour les jeunes pousses) (Fig.62). L'analyse de la variance à un critère de classification signale des différences très hautement significatives entre les organes ($p=0.000$) (Annexe 5, Tab.1).

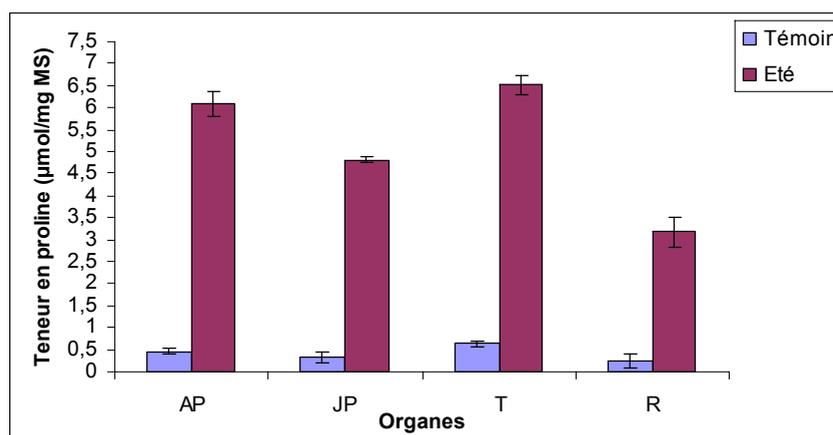


Fig.62 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison estivale de l'année 2008

Le test de Newman-keuls au seuil de 5% donne trois groupes homogènes, le premier (A) correspond aux tiges et les aiguilles des anciennes pousses qui marquent les moyennes les plus élevées (6.518 et 6.102 $\mu\text{mol/mg MS}$ successivement), le deuxième groupe (B) comprend les aiguilles des jeunes pousses avec une moyenne de 4.817 $\mu\text{mol/mg MS}$, alors que les racines occupent le dernier groupe (C) affichant la plus faible moyenne (3.169 $\mu\text{mol/mg MS}$)(Annexe 5; Tab.7).

d)-La saison automnale :

Pour la saison automnale, la teneur en proline est plus élevée au niveau des tiges (1.508 \pm 0.04 $\mu\text{mol/mg MS}$), alors qu'elle est plus faible au niveau des racines 0.946 \pm 0.222 $\mu\text{mol/mg MS}$ par rapport aux autres organes testées (Fig.63). Les résultats obtenus montrent que les teneurs des différents organes de cet acide aminé durant la saison automnale sont supérieures à celles du témoin avec des pourcentages d'augmentation de : 139.74% pour les tiges, 220.08% pour les aiguilles de anciennes pousses, 272.44% pour les racines et 297.25% pour les aiguilles des jeunes pousses. Le test de l'analyse de la variance à un critère signale une différence hautement significative entre les organes pour ce paramètre ($p=0.007$) (Annexe 5, Tab.1).

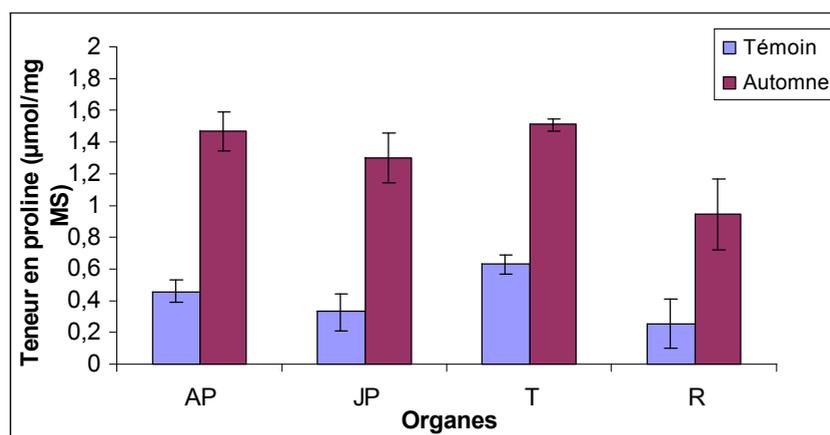


Fig.63 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison automnale de l'année 2008

La comparaison des moyennes réalisées par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5%, donne deux groupes distincts, où effectivement on note que le premier groupe (A) englobe les tiges et les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses avec des teneurs maximales : 1.508 $\mu\text{mol/mg MS}$, 1.466 $\mu\text{mol/mg MS}$ et 1.303 $\mu\text{mol/mg MS}$. Alors que les racines sont affectées au deuxième groupe (B) qui présente la plus faible moyenne (0.946 $\mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 5; Tab.7).

3.1.1- Effet des variations thermiques saisonnière sur les teneurs en proline :

Les résultats de la teneur en proline chez les semis du pin d'Alep illustrée dans la figure n°64 montrent que les basses températures de la saison hivernale et les hautes températures de la saison estivale ont induit une très grande accumulation de la proline au niveau des différents organes.

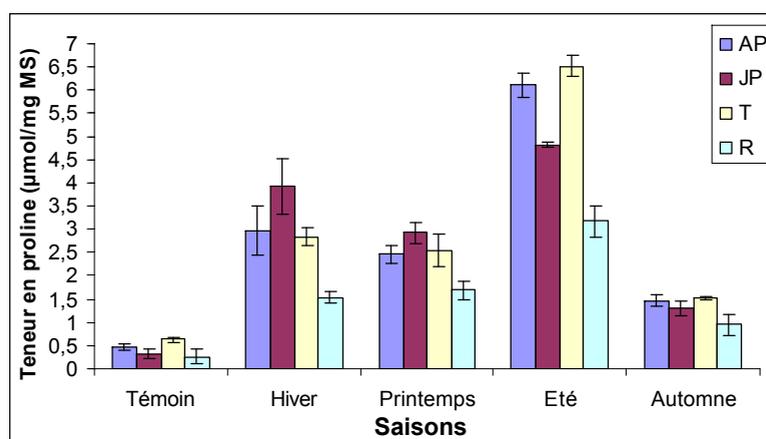


Fig.64 : Variation inter-saisonnière des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées durant la saison estivale avec des taux d'augmentation de 1232.31% au niveau des aiguilles des anciennes pousses, 1368% pour les aiguilles des jeunes pousses, 936.24% pour les tiges et 1147.63 au niveau des racines. Alors que les teneurs les plus faibles sont affichées durant la saison automnale avec des taux d'augmentation allant de 139.74% à 297.25% respectivement au niveau des tiges et des aiguilles des jeunes pousses.

En effet, les gelées tardives enregistrées durant la saison printanière provoquent aussi une augmentation de la teneur en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep. Pour cette saison, la valeur minimale est enregistrée au niveau des racines $1.681 \pm 0.207 \mu\text{mol/mg MS}$, elle représente le sextuple par rapport au témoin. Par contre la valeur maximale est celle des aiguilles des jeunes pousses ($2.923 \pm 0.232 \mu\text{mol/mg MS}$) avec un gain de 791.15% par rapport au témoin.

Les résultats illustrés dans la figure 64 montrent une grande différence des teneurs en proline entre les organes et entre les saisons, ceci est confirmé par l'analyse de la variance à deux critères de classification qui révèle l'existence d'une différence très hautement significative entre les différents organes ($p=0.000$) et entre les différentes saisons ($p=0.000$) (Annexe 6; Tab.1).

La comparaison des moyennes révèle l'existence de quatre groupes homogènes pour le facteur saison où le premier groupe (A) comprend la saison estivale avec la plus forte moyenne ($5.151 \mu\text{mol/mg MS}$), le deuxième groupe (B) correspond à la saison hivernale, le troisième groupe (C) englobe la saison printanière et le dernier groupe (D) correspond à l'automne qui présente la plus faible moyenne ($1.306 \mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 6; Tab.2).

Pour le facteur organe, le test de Newman-keuls au seuil de 5% donne deux groupes homogènes, le premier (A) comprend les anciennes et les jeunes pousses avec les tiges représentant les plus grandes moyennes qui varient de 3.244 à $3.353 \mu\text{mol/mg MS}$, le second (B) comprend les racines qui affichent la plus faible moyenne ($1.830 \mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 6; Tab.2).

3.2- Sucres solubles :

a)- La saison hivernale :

Durant la saison hivernale, la teneur en sucres solubles varie entre les différents organes (aiguilles de deux pousses de croissance, tiges et racines). Ceci est confirmé par l'analyse de la variance à un critère de classification qui signale une différence significative entre les différents organes testés ($p=0.023$) (Annexe 5; Tab.2). Le taux le plus élevé est enregistré au niveau des aiguilles des jeunes pousses ($909.509 \pm 3.613 \mu\text{mol/mg MS}$), il correspond à une augmentation de 342.23% par rapport au témoin. Alors que les faibles teneurs sont enregistrées au niveau des racines ($433.816 \pm 11.39 \mu\text{mol/mg MS}$) ce qui correspond à une augmentation de 88.16% par rapport au témoin (Fig.65).

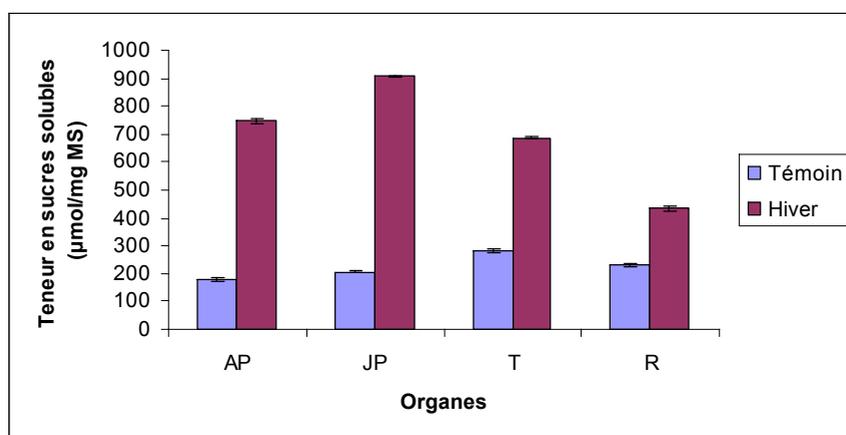


Fig.65 : Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison hivernale de l'année 2007-2008

Concernant les organes, la comparaison des moyennes donne trois groupes homogènes, le premier (A) englobe les aiguilles des jeunes pousses avec la plus forte moyenne ($909.509 \mu\text{mol/mg MS}$), le deuxième groupe (AB) est un groupe intermédiaire qui comprend les aiguilles des anciennes pousses avec les tiges, le dernier groupe (B) correspond aux racines avec la plus faible moyenne ($433.816 \mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 5; Tab.7).

b)-La saison printanière :

Pour l'ensemble des organes, les résultats obtenus durant la saison printanière indiquent une variation positive par rapport au témoin (Fig.66). L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les organes ($p=0.001$) (Annexe5; Tab.2).

Le taux d'augmentation pour les anciennes pousses comme pour les jeunes pousses, est le triple par rapport au témoin, alors que celui des tiges représente le double et il est égale à 45.54% au niveau des racine avec une accumulation de $335.564 \pm 3.115 \mu\text{mol/mg MS}$.

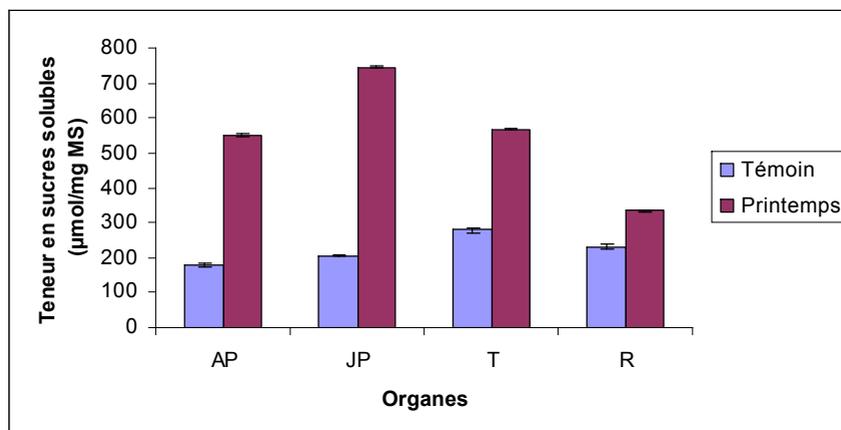


Fig.66 : Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison printanière de l'année 2008

La comparaison des moyennes donne trois groupes homogènes, le premier (A) correspond aux aiguilles des jeunes pousses qui marquent la moyenne la plus élevée ($745.840 \mu\text{mol/mg MS}$), le deuxième groupe (B) comprend les tiges et les aiguilles des anciennes pousses, alors que les racines occupent le dernier groupe (C) en affichant la plus faible moyenne ($335.564 \mu\text{mol/mg MS}$) (Annexe 5; Tab.7).

c)-La saison estivale :

Pour la saison estivale, l'accumulation des sucres au niveau des différents organes des semis du pin d'Alep est légèrement supérieure à celle du témoin (Fig.67). Les taux d'augmentation sont de l'ordre de 35.82%, 7.58%, 23.24% et 9.81% respectivement au niveau des aiguilles des anciennes pousses, des jeunes pousses, des tiges et au niveau des racines (Annexe3 ; Tab.4). L'analyse de la variance montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les organes testées ($p= 0,202$) (Annexe 5; Tab.2).

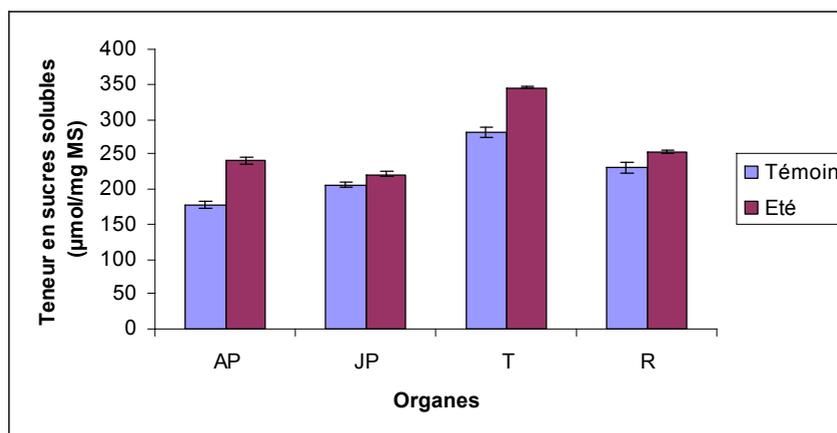


Fig.67 : Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison estivale de l'année 2008

d)-La saison automnale :

En automne, la teneur en sucres solubles est légèrement élevée au niveau des différents organes par rapport au témoin, la valeur la plus élevée est celle enregistrée au niveau des tiges $455.605 \pm 3.583 \mu\text{mol/mg MS}$ avec un gain estimé à 62.64%, alors que la plus faible est observée au niveau des racines ($335.564 \pm 3.115 \mu\text{mol/mg MS}$), soit une augmentation de 45.54% par rapport au témoin (Fig.68). L'analyse de la variance à un critère de classification est non significative en fonction des organes testées ($p=0.183$) (Annexe 5; Tab.2).

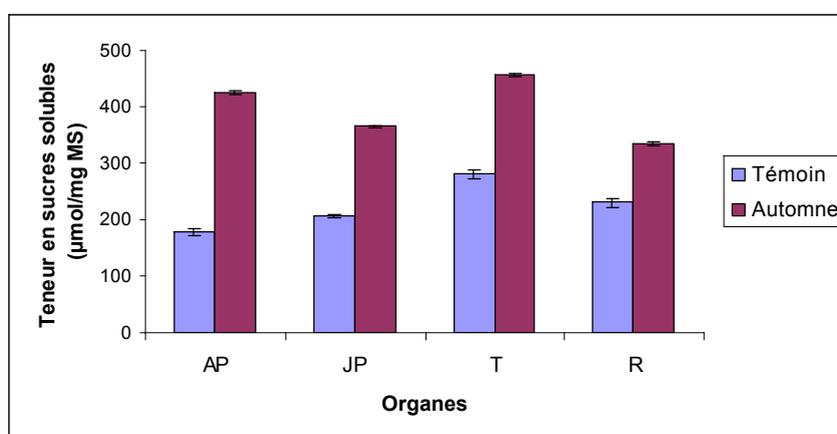


Fig.68 : Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison automnale de l'année 2008

3.2.1- Effet des variations thermiques inter-saisonnière sur les teneurs en sucres solubles:

Comparés aux témoins, les semis de pin d'Alep élevés dans les conditions naturelles produisent plus de sucres solubles dans leurs organes. La saison hivernale amplifie davantage l'accumulation des sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep, atteignant pratiquement le quadruple celle du témoin pour les aiguilles des deux pousses de

croissance. Alors que les racines et les tiges présentent des gains en sucres solubles allant de 88.16% à 145.64% respectivement.

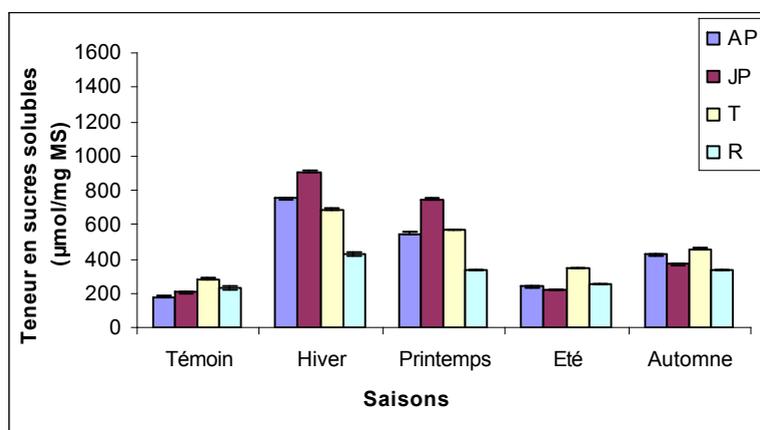


Fig.69 : Variation inter-saisonnière des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep

Ainsi, les basses températures enregistrées durant la saison printanière (129 heures) ont induit aussi une très grande accumulation des sucres solubles au niveau des différents organes avec des taux d'augmentation allant de 209.29% à 262.65% respectivement au niveau des aiguilles des anciennes et des jeunes pousses, 102.72% au niveau des tiges et 45.54% pour les racines. L'accumulation des sucres solubles est faible durant la saison automnale et estivale mais elle présente toujours des taux d'augmentation élevée par rapport au témoin (Fig.69).

L'analyse de la variance à deux critères de classification indique qu'il existe une différence très hautement significative entre les organes et entre les saisons (Annexe 6; Tab.1).

Le test de Newman-keuls au seuil de 5% classe les saisons en trois groupes homogènes. Le premier groupe (A) correspond à la saison hivernale auquel les semis accumulent fortement les sucres solubles avec une moyenne de 694,825 µmol/mg MS, le deuxième groupe (B) correspond à la saison printanière, le dernier groupe (C) englobe la saison automnale et estivale avec les plus faibles moyennes (Annexe 6; Tab.2).

Pour le facteur organe, la comparaison des moyennes révèle l'existence de deux groupes, le premier (A) englobe les tiges, les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses, le second groupe correspond aux racines avec une faible moyenne (339.533 µmol/mg MS) (Annexe 6; Tab.2).

3.3- Chlorophylle :

a)- La saison hivernale :

- *La chlorophylle « a » :*

La figure 70 montre que les périodes de refroidissement enregistrées durant la saison hivernale entraînent une diminution de la teneur en chlorophylle « a » au niveau des aiguilles des semis de pin d'Alep. Les taux de réduction ont atteint 60.27 % au niveau des aiguilles des anciennes pousses et 71.04% pour les aiguilles des jeunes pousses. L'analyse de la variance à un seul critère de classification montre une différence très hautement significative entre les organes testés ($p=0.000$) (Annexe 5; Tab.3).

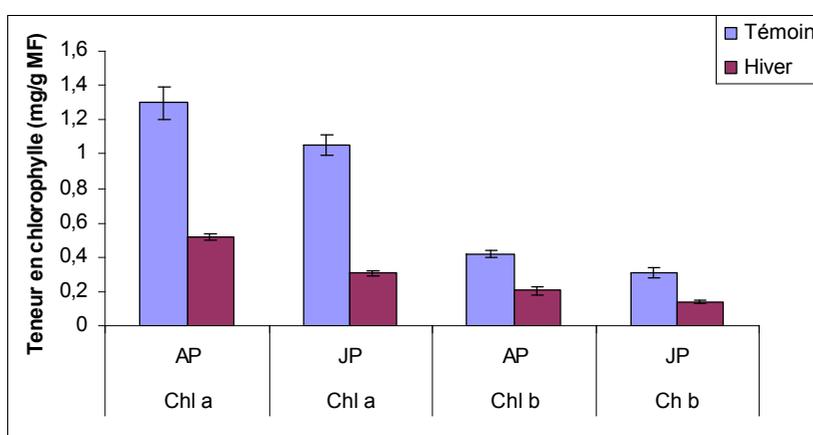


Fig.70: Teneurs en chlorophylle « a » et chlorophylle « b » dans les aiguilles des anciennes et les jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison hivernale

La comparaison des moyennes pour le facteur organe fait sortir deux groupes homogènes dont le premier groupe correspond aux aiguilles des anciennes pousses de croissance avec la plus forte moyenne (0.516 mg/g MF), le second groupe englobe les aiguilles des jeunes pousses avec la plus faible moyenne (0.304 mg/g MF) (Annexe 5; Tab.8).

- *La chlorophylle « b » :*

Proportionnellement à la chlorophylle « a », la saison hivernale a induit une réduction de la teneur en chlorophylle « b » par rapport au témoin (Fig.70). Au niveau des anciennes pousses le taux de diminution est de l'ordre de 50.23% alors qu'il est de 53.92% au niveau des jeunes pousses. On note ainsi que la teneur en chlorophylle « a » et « b » au niveau des feuilles des anciennes pousses de croissance est supérieure à celle des jeunes pousses. L'analyse de la variance montre une différence significative entre les organes ($p = 0,011$) (Annexe 5; Tab.4).

Pour le facteur organe, le test de Newman et Keuls fait ressortir deux groupes de moyennes homogènes. Le premier (A) englobe les aiguilles des anciennes pousses avec la moyenne la plus élevée (0.208 mg/g MF), le second (B) englobe les aiguilles des jeunes pousses avec la moyenne la plus faible (0.141 mg/g MF) (Annexe 5; Tab.8).

- **La chlorophylle totale :**

Comme nous le montre la figure 71, la saison hivernale entraîne une baisse de la teneur en chlorophylle totale. Les diminutions atteignent 57.91% pour les aiguilles des anciennes pousses et 67.18% pour les jeunes pousses par rapport au témoin. L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les pousses ($p = 0,000$) (Annexe 5; Tab.5).

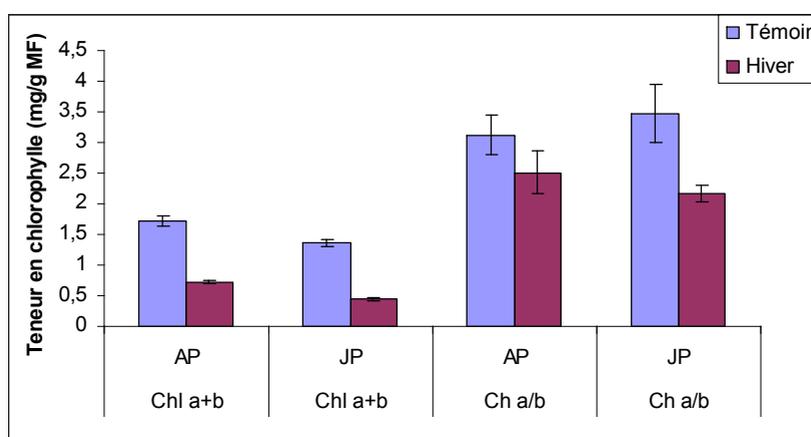


Fig.71 : Variation de la teneur en chlorophylle totale et du rapport (chlorophylle a/b) dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison hivernale

Le test de Newman-keuls au seuil de 5% donne deux groupes des organes homogènes, le premier (A) correspond aux aiguilles des anciennes pousses qui marquent la moyenne la plus élevée (0.723 mg/g MF), le second (B) comprend les aiguilles des jeunes pousses avec la moyenne 0.445 mg/g MF (Annexe 5; Tab.8).

- **La chlorophylle a/b :**

D'après la figure 71, le rapport chlorophyllien (chlorophylle a/b) diminue de 19.39% au niveau des aiguilles des anciennes pousses et de 37.71% pour les aiguilles des jeunes pousses. L'analyse de la variance à un critère montre que le test est non significative de ce paramètre en fonction des organes ($p = 0.182$) (Annexe 5, Tab.6).

b)- La saison printanière :

• *La chlorophylle « a » :*

Durant la saison printanière, les taux de chlorophylle « a » restent relativement stable avec une légère augmentation de l'ordre de 3.38% pour les pousses adultes et de 8.76 % pour les jeunes pousses (Fig.72). L'analyse de la variance à un critère de classification (Annexe 5; Tab.3) montrent une différence très hautement significative entre les organes testées ($p=0.000$).

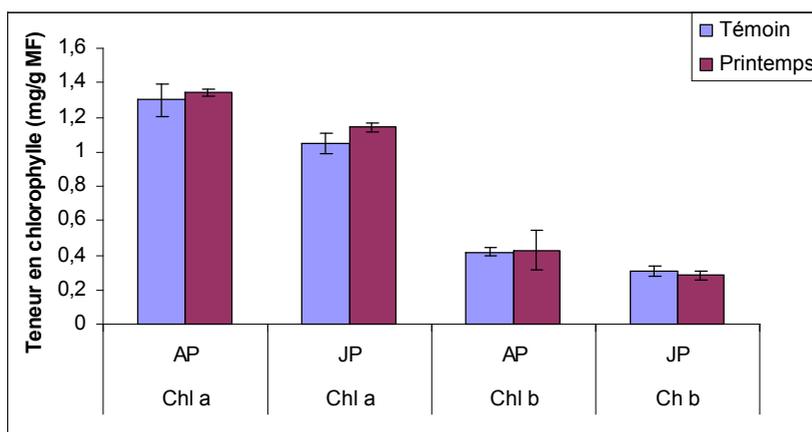


Fig.72 : Teneurs en chlorophylle « a » et « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison printanière

La comparaison des moyennes réalisées par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5%, donne deux groupes distincts, où effectivement on note que le premier groupe (A) englobe les aiguilles des anciennes pousses avec la valeur maximale (1.343 mg/g MF), alors que les aiguilles des jeunes pousses sont affectés au deuxième groupes (B) qui présente la plus faible moyenne (1.142 mg/g MF) (Annexe 5; Tab.8).

• *La chlorophylle « b » :*

Les résultats concernant les teneurs en chlorophylle « b » des semis de pin d'Alep durant la saison printanière sont illustrées dans la figure 72. On remarque que les aiguilles des anciennes pousses accusent une légère augmentation de la chlorophylle « b » de l'ordre de 2.63%, alors que les aiguilles des jeunes pousses présente une diminution de 7.84% par rapport au témoin. L'analyse de la variance à un critère de classification (Annexe 5; Tab.4) montrent que le test est non significatif pour le paramètre organe ($p=0.095$).

- **La chlorophylle totale :**

Les teneurs des aiguilles de pin d'Alep en chlorophylle totale sont supérieures à celles du témoin aussi bien pour les aiguilles des jeunes pousses (5.01%) que pour les aiguilles des anciennes pousses (3.14%). Les résultats de l'analyse de la variance à un critère de classification montrent que le test est hautement significatif pour le paramètre organe ($p=0.010$) (Annexe 5; Tab.5).

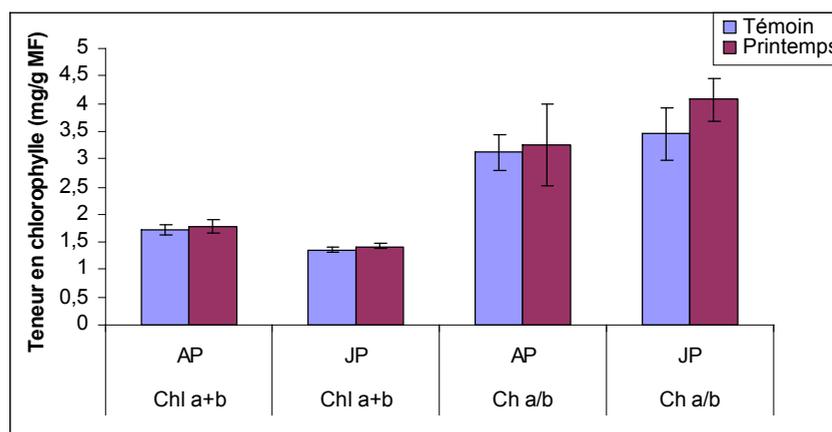


Fig.73 : Variation de la teneur en chlorophylle totale et du rapport (a/b) dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison printanière

La comparaison des moyennes pour le facteur organe fait ressortir deux groupes homogènes dont le premier groupe correspond aux aiguilles des anciennes pousses avec la plus forte moyenne (1.772 mg/g M.F), le second groupe englobe les aiguilles des jeunes pousses avec une faible moyenne (1.424 mg/g M.F) (Annexe 5; Tab.8).

- **La chlorophylle a /b :**

D'après la figure 73, le rapport (a/b) durant la saison printanière augmente par rapport au témoin de 4.72% pour les aiguilles des pousses adultes et 17.41% pour les aiguilles des jeunes pousses. L'analyse de la variance à un critère de classification (Annexe 5; Tab.6) montrent que le test est non significatif pour le paramètre organe ($p=0.168$).

c)- La saison estivale :

- **La chlorophylle « a » :**

Durant la saison estivale de l'année 2008, pour les pousses adultes comme pour les pousses jeunes, on remarque une réduction importante de la teneur en chlorophylle « a » par rapport au témoin (Fig.74). On a enregistré un taux de réduction de 59.19 % pour les pousses

adultes et 61.04% pour les jeunes pousses par rapport au témoin. Les résultats de l'analyse de la variance à un critère de classification (Annexe 5; Tab.3) montrent que le test est non significatif pour le paramètre organe ($p=0.145$).

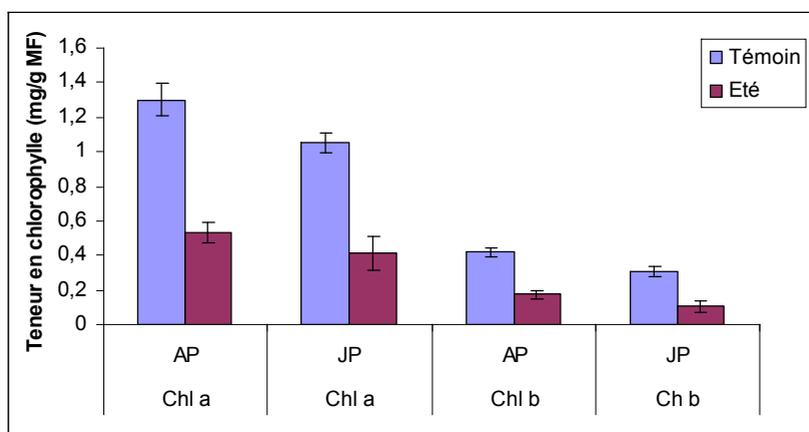


Fig.74 : Teneurs en chlorophylle « a » et « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison estivale

- **La chlorophylle « b » :**

Après les périodes du réchauffement enregistrées durant la saison estivale de l'année 2008, les aiguilles des semis de pin d'Alep sont relativement pauvres en chlorophylle « b », donc les semis de pin d'Alep exposés aux conditions naturelles deviennent moins riches en chlorophylle « a » et « b » que les semis placés en conditions semi-contrôlées (témoin) (Fig.74). Le taux de réduction de la chlorophylle « b » est de l'ordre de 57.89% au niveau des aiguilles des anciennes pousses alors qu'il est de 65.35% pour les aiguilles des jeunes pousses. L'analyse de la variance montre une différence significative entre les organes ($p = 0,043$) (Annexe 5; Tab.4).

L'analyse statistique des données par le biais du test de Newman et Keuls fait ressortir deux groupes de moyennes homogènes. Le premier (A) comporte les aiguilles des anciennes pousses avec la moyenne la plus élevée (0.176 mg/g M.F), le seconde (B) correspond aux aiguilles des jeunes pousses avec la moyenne la plus faible (0.106 mg/g M.F) (Annexe 5; Tab.8).

- **La chlorophylle totale :**

Selon la figure 75, les teneurs de la chlorophylle totale durant la saison estivale sont toujours inférieures aux plants témoins. Les taux de réduction sont de l'ordre de 58.90% pour les pousses adultes et 62.02% pour les jeunes pousses par rapport au témoin. L'analyse de la variance est significative pour le facteur organe ($p=0.018$) (Annexe 5; Tab.5).

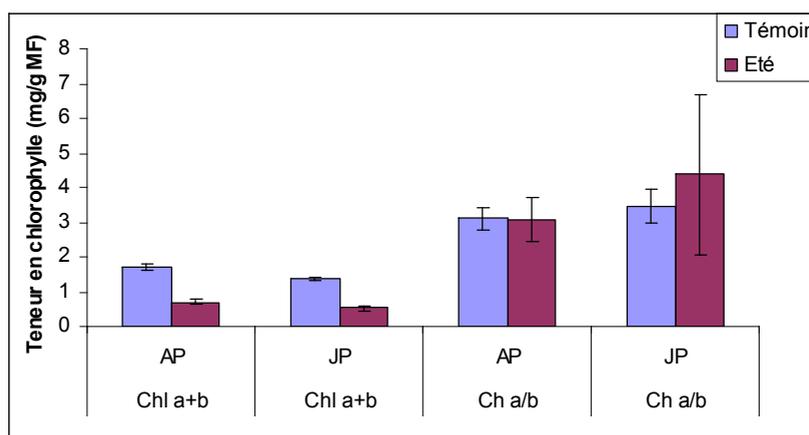


Fig.75 : Variation de la teneur en chlorophylle totale et du rapport (a/b) dans les anciennes et les jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison estivale

Ces résultats sont vérifiés par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5% qui effectivement nous isole deux groupes homogènes pour le facteur organe, le premier (A) correspond aux aiguilles des anciennes pousses avec la moyenne la plus élevée (0.706 mg/g M.F), le second (B) englobe les aiguilles des jeunes pousses avec une moyenne de 0.515 mg/g M.F (Annexe 5; Tab.8).

- **La chlorophylle a /b :**

D'après la figure 75 on remarque que les aiguilles des jeunes pousses augmentent leur rapport chlorophyllien durant la saison estivale avec un taux de 26.33%, alors que ce rapport est presque identique au témoin pour les aiguilles des anciennes pousses. Le test de l'analyse de la variance à un critère de classification, montre qu'il n'existe pas une différence significative entre les pousses de croissance ($p=0.398$). (Annexe 5; Tab.6).

d)- La saison automnale :

- **La chlorophylle « a » :**

Pour la saison automnale, les résultats montrent une légère réduction des teneurs en chlorophylle « a » au niveau des aiguilles des anciennes pousses avec un taux de diminution de l'ordre de 20.63% (Fig.76). L'analyse de la variance à un critère de classification (Annexe 5; Tab.3) montre que le test est non significatif pour le paramètre organe ($p=0.992$).

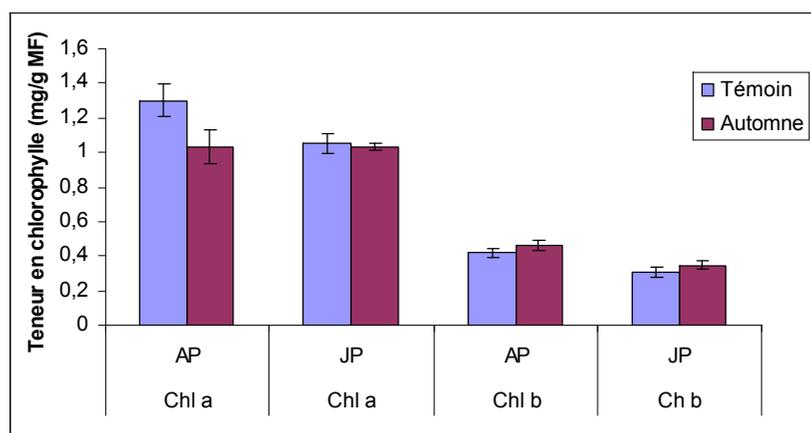


Fig.76 : Teneurs en chlorophylle « a » et « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison automnale

- **La chlorophylle « b » :**

Les résultats concernant les teneurs en chlorophylle « b » dans les semis du pin d'Alep durant la saison automnale sont illustrées dans la figure 76. On remarque que les aiguilles accusent une légère augmentation de la chlorophylle « b » de l'ordre de 10.04% pour les anciennes pousses, 13.39% pour les jeunes pousses par rapport au témoin. Le test de l'analyse de la variance à un critère de classification montre qu'il existe une différence hautement significative entre les organes testés ($p=0.01$) (Annexe 5; Tab.4).

Pour le facteur organe, la comparaison des moyennes fait sortir deux groupes homogènes dont le premier groupe (A) correspond aux aiguilles des anciennes pousses avec la plus forte moyenne (0.460 mg/g MF), le second (B) correspond aux aiguilles des jeunes pousses avec une faible moyenne (0.347 mg/g MF) (Annexe 5; Tab.8).

- **La chlorophylle totale :**

Les résultats obtenus montrent une légère diminution de la teneur en chlorophylle totale au niveau des anciennes pousses avec un taux de réduction (13.21%) par rapport au témoin, alors que les résultats obtenus pour les jeunes pousses durant la saison automnale montrent que la teneur des aiguilles en chlorophylle totale se rapprochant du témoin (Fig.77). L'analyse de la variance à un critère ne signale pas des différences significatives de ce paramètre en fonction des organes ($p= 0.216$) (Annexe 5, Tab.5).

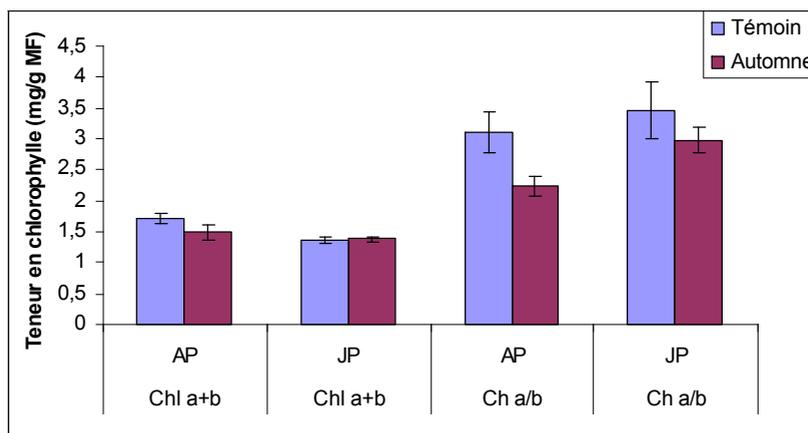


Fig.77 : Variation de la teneur en chlorophylle totale et du rapport (chlorophylle a/b) dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison automnale

- **La chlorophylle a /b :**

Durant la saison automnale, le rapport chlorophyllien (chlorophylle a/b) chez les aiguilles des semis de pin d'Alep est légèrement inférieur par rapport au témoin (Fig.77). Les diminutions atteignent 28.09% pour les aiguilles des anciennes pousses et 13.89% pour les jeunes pousses par rapport au témoin. Le test de l'analyse de la variance à un critère de classification (Annexe 5; Tab.6), montre qu'il existe une différence hautement significative entre les pousses ($p= 0.008$).

Pour le facteur organe, la comparaison des moyennes donne deux groupes homogènes, le premier (A) correspond aux aiguilles des jeunes pousses qui marquent la moyenne la plus élevée (2.982), alors que les aiguilles des anciennes pousses occupent le deuxième groupe (B) et affichent la plus faible moyenne (2.239) (Annexe 5; Tab.8).

3.3.1- Effet des variations thermiques saisonnières sur les teneurs en chlorophylle :

- **La chlorophylle « a » :**

L'examen de la figure 78 montre que, dans les aiguilles de pin d'Alep, le contenu en chlorophylle « a » diminue fortement durant la saison hivernale et estivale. On note toujours une concordance entre les concentrations faibles en chlorophylle et les périodes de basse et de haute température.

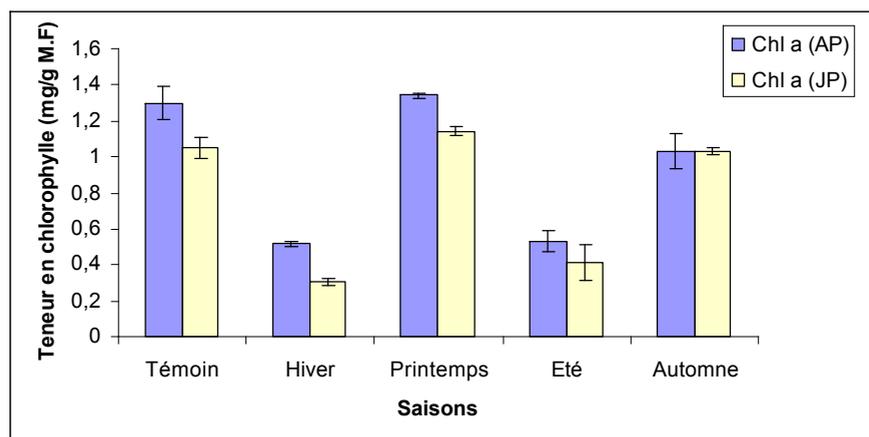


Fig.78 : Variation inter-saisonnière des teneurs en chlorophylle « a » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep

En effet, pendant l'hiver, on note une baisse de la chlorophylle «a » de 60.27% au niveau des aiguilles des ancienne pousses et de 71.04% pour les aiguilles des jeunes pousses par rapport au témoin. Alors que pendant la saison estivale elle atteint 59.19% et 61.04% par rapport au témoin respectivement dans les aiguilles des pousses adultes et des jeunes pousses.

Durant la saison printanière, les aiguilles des deux pousses de pin d'Alep produisent un peu plus de la chlorophylle « a » avec un gain léger de 3.38% pour les pousses adultes et 8.76 % pour les jeunes pousses. Cependant durant la saison automnale de l'année 2008, on note une légère diminution de la teneur en chlorophylle « a » au niveau des pousses adultes (-20.63%) par rapport au témoin tandis que la teneur au niveau des jeunes pousses reste presque identique à celle du témoin (-1.81%).

L'analyse de la variance est très hautement significative pour les différentes saisons et entre les aiguilles de deux pousses de croissance (Annexe 6; Tab.1).

Le test de Newman-keuls classe les saisons en trois groupes homogènes. Le premier groupe (A) correspond à la saison printanière auquel les aiguilles des semis de pin d'Alep synthétisent fortement la chlorophylle « a » avec une moyenne de 1.243 mg/g M.F, le deuxième groupe (B) correspond à la saison automnale avec une moyenne de 1.031 mg/g M.F, le dernier groupe (C) englobe les saisons hivernale et estivale avec des faibles teneurs (0.470 mg/g M.F pour l'été et 0.410 mg/g M.F pour l'hiver) (Annexe 6; Tab.3).

La comparaison des moyennes pour le facteur organe fait sortir deux groupes homogènes dont le premier groupe (A) correspond aux aiguilles des anciennes pousses de croissance avec la

plus forte moyenne (0.855 mg/g M.F) et le second groupe englobe les aiguilles des jeunes pousses avec une faible moyenne (0.722 mg/g M.F) (Annexe 6; Tab.3).

- **La chlorophylle « b » :**

Pour les quatre saisons, le taux de chlorophylle « b » chez les aiguilles des anciennes pousses dépasse celui des jeunes pousses. En présence de stress thermique durant la saison hivernale et estivale, les quantités de chlorophylle « b » restent faibles pour les deux pousses (Fig.79). Alors que pendant la saison printanière et automnale, les aiguilles des anciennes pousses synthétisent fortement la chlorophylle « b » par rapport à la saison hivernale et estivale avec des taux d'augmentation allant de 2.63% à 10.04% par rapport au témoin. Par contre les aiguilles des jeunes pousses présentent une légère diminution (-7.84% par rapport au témoin) durant la saison printanière.

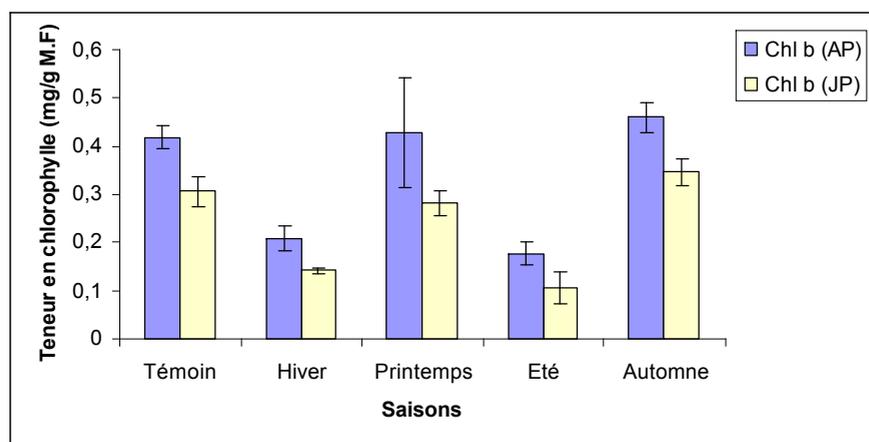


Fig.79 : Variation inter-saisonnière des teneurs en chlorophylle « b » dans les aiguilles des anciennes et jeunes pousses des semis de pin d'Alep

L'analyse de la variance est très hautement significative pour les différentes saisons et entre les deux pousses de croissance (Annexe 6; Tab.1).

Pour le facteur saison, l'analyse statistique des données par le biais du test de Newman et Keuls fait ressortir deux groupes de moyennes homogènes. Le premier englobe les saison automnale et printanière avec les moyennes les plus élevées (0.404 et 0.356 mg/g M.F) respectivement, le second groupe comporte les deux autres saisons : l'hivernale avec une moyenne de 0.174mg/g M.F et l'estivale avec une moyenne de 0.141mg/g M.F(Annexe6; Tab.3).

Pour le facteur organe, la comparaison des moyennes révèle l'existence de deux groupes homogènes, Le premier correspond aux aiguilles des anciennes pousses qui caractérisent la

moyenne la plus élevée (0.318 mg/g M.F), le second groupe correspond aux aiguilles des jeunes pousses avec une faible moyenne (0.219 mg/g M.F) (Annexe 6; Tab.3).

- **La chlorophylle totale :**

Les stress enregistrés durant la saison hivernale et estivale, même à très faible intensité, entraînent une chute importante des teneurs en chlorophylle totale dans les aiguilles des deux pousses (Fig.80). Pour la saison hivernale caractérisée par des basses températures inférieures à 2°C qui durent 228 heures, la diminution des teneurs en chlorophylle totale atteint 57.91% et 67.18% par rapport au témoin, respectivement dans les aiguilles des pousses adultes et les aiguilles des jeunes pousses. Cependant, la baisse des teneurs en chlorophylle totale, décelée dans les différents tissus photosynthétiques durant la saison estivale (Annexe6 ; Tab.1), peut atteindre 58.9% et 62.02%, respectivement, pour les aiguilles des pousses adultes et les aiguilles des jeunes pousses.

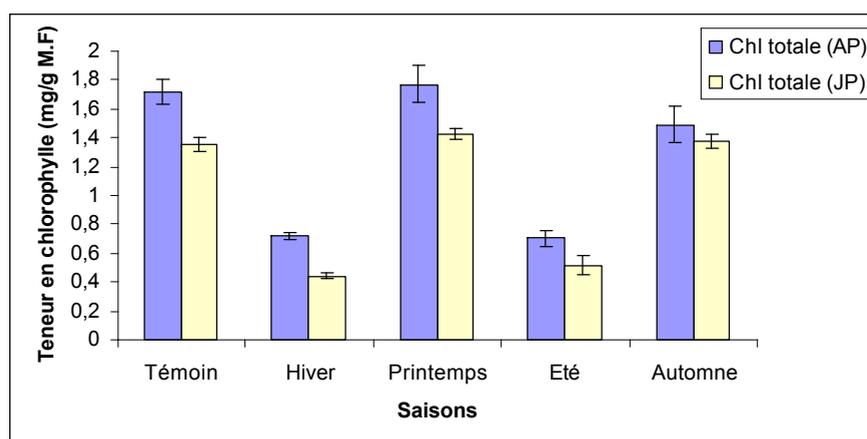


Fig.80: Variation inter-saisonnière des teneurs en chlorophylle totale dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep

On peut noter que les teneurs en pigments photosynthétiques au niveau des aiguilles des semis de pin d'Alep dépendent de la sévérité de la saison (Fig.80). Une hausse importante des teneurs en chlorophylle totale est enregistrée durant la saison printanière et automnale tout en restant supérieure à celles enregistrées pendant la saison hivernale et estivale.

Le test de l'analyse de la variance à deux facteurs de classification (saisons et organes), montre qu'il existe une différence très hautement significative entre saisons et entre les organes (Annexe 6; Tab.1).

Ces résultats sont vérifiés par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5% qui nous isole deux groupes homogènes pour le facteur saison, le premier (A) comprend les saisons printanière et automnale, le second englobe les autres (estivale et hivernale) (Annexe 6; Tab.3).

Concernant les organes, le test de Newman-keuls nous donne deux groupes homogènes qui sont classés comme suit ; les aiguilles des anciennes pousses avec une moyenne de 1.173 mg/g M.F (groupe A) et les aiguilles des jeunes pousses avec une moyenne de 0.941 mg/g M.F (groupe B) (Annexe 6; Tab.3).

- **La chlorophylle a /b :**

Durant la saison hivernale et automnale, les teneurs des aiguilles des deux pousses en chlorophylle a/b sont inférieures à celles du témoin avec des taux de diminution allant de 13.89% à 37.71% (Fig.81). Dans ces conditions, il y a plus de chlorophylle « b », ce qui provoque une diminution du rapport chlorophyllien (chlorophylle a/b). En revanche, ce rapport est relativement élevé durant la saison printanière ce qui indique que l'équilibre pigmentaire est changé. Durant la saison estivale, on remarque que pour les aiguilles des pousses adultes, le rapport (a/b) reste relativement inchangé.

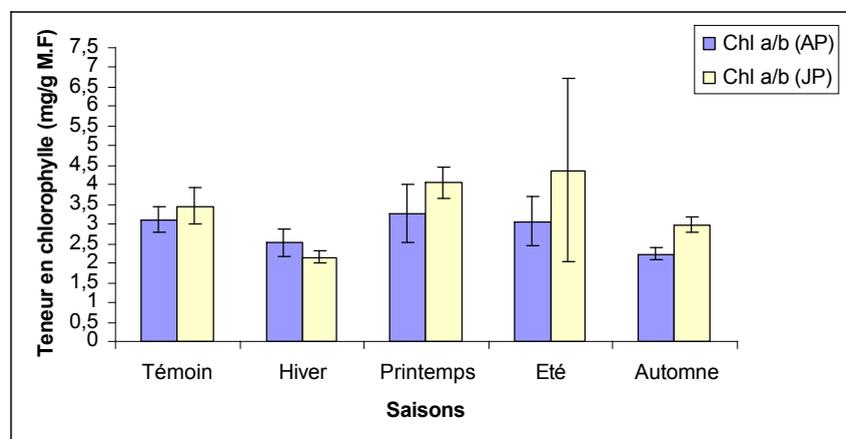


Fig.81 : Variation inter-saisonnière des teneurs en chlorophylle a/b dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep

L'analyse de la variance à deux critères de classifications est significative en fonction des saison ($p=0.036$) et non significative en fonction des organes ($p=0.113$) (Annexe 6; Tab.1).

3.4- Corrélation entre les variables (teneur en proline, sucre solubles et chlorophylles) :

Cette matrice a pour objet de tester les liaisons qui peuvent exister entre les variables. Elle renferme 06 variables, chacune est mesurée pendant chaque saison au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep (aiguilles des anciennes et des jeunes pousses, tiges et racines).

Tab.22 : Matrice de corrélation entre les variables

Variables	Proline	Sucres solubles	Chl "a"	Chl "b"	Chl "a+b"	Chl "a/b"
Proline	1					
Sucres solubles	-0,415	1				
Chl "a"	-0,646	-0,007	1			
Chl "b"	-0,819	0,050	0,884	1		
Chl "a+b"	-0,704	0,007	0,993	0,933	1	
Chl "a/b"	0,368	-0,381	0,274	-0,165	0,170	1

En gras; les variables pour lesquelles une corrélation est significative au seuil de 5%.

Au seuil de 5%, les teneurs en proline sont négativement corrélées aux teneurs en chlorophylle « a » ($r=-0.646$), et « b » ($r=-0.819$) et à la teneur en chlorophylle totale ($r=-0.704$). En effet, une corrélation fortement positive de l'ordre de 0.884 et 0.993 a été observée entre les teneurs en chlorophylle « a » d'une part et les teneurs en chlorophylle « b » et chlorophylle totale d'autre part (Tab.22).

3.5- Evolution temporelle des marqueurs biochimiques :

L'évolution des teneurs en marqueurs biochimiques chez les semis de pin d'Alep a été suivie durant les quatre saisons de l'année expérimentale (2007-2008).

Pour chaque saison, nous disposons d'une série de 4 valeurs de teneur : trois pour la fraction apicale (tiges, aiguilles des anciennes et des jeunes pousses), une pour la fraction basale. Il est en effet possible de déduire les teneurs au niveau de la plante entière.

a)- Evolution de la teneur en proline chez les semis de pin d'Alep en fonction des saisons :

Le tracé temporel de la teneur en proline semble présenté une variation d'évolution entre les quatre saisons de l'année (Fig.82).

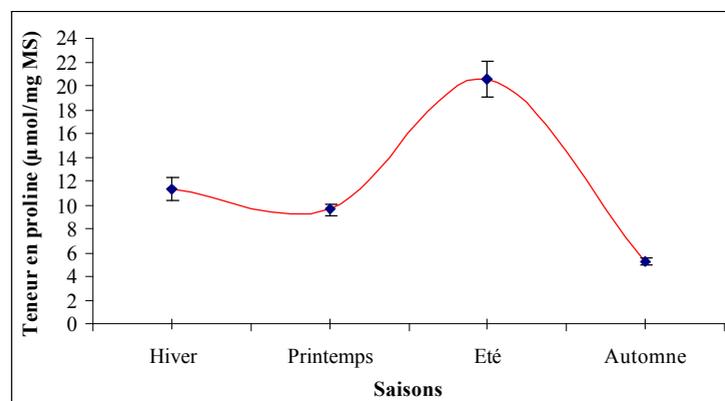


Fig.82 : Cumul saisonnier de la teneur en proline au niveau de la plante entière des semis de pin d'Alep en conditions naturelles

La teneur en proline totale oscille, sur l'intervalle de temps étudié, entre 5.223 et de 20.606 µmol/mg MS. Après la saison hivernale, on remarque qu'il y a une légère diminution de la proline totale au niveau de la plante entière. Cependant, elle présente des concentrations significativement plus élevées sur la période printanière – estivale que sur la période estivale - automnale où elle marque sa teneur minimale (5.223 ± 0.256 µmol/mg MS).

b)- Evolution de la teneur en sucres solubles chez les semis de pin d'Alep au cours des saisons :

D'après la figure 83, on remarque que la teneur totale en sucres solubles ne présente plus un maximum estival comme pour la proline, mais plutôt hivernale, tandis que la saison minimale pour l'accumulation de ce marqueur devient estivale. Au niveau de la plante entière, on note une accumulation remarquable de la teneur en sucres solubles durant la saison hivernale (2779.299 ± 197.54 µmol/mg MS), puis elle diminue progressivement durant les saisons printanières et estivales, pour s'élever légèrement pour la période été – automne où elle atteint une valeur de 1581.648 ± 54.79 µmol/mg MS.

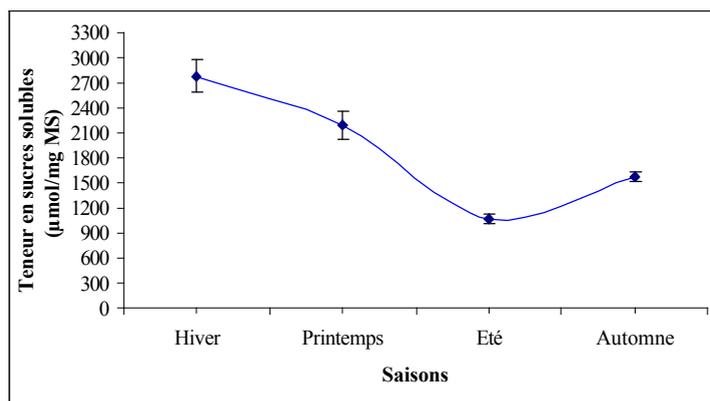


Fig.83 : Cumul saisonnier de la teneur en sucres solubles au niveau de la plante entière des semis de pin d'Alep en conditions naturelles

c)- Evolution de la teneur en chlorophylle totale chez les semis de pin d'Alep au cours des saisons :

La figure 84 représente graphiquement la variation saisonnière de la teneur en chlorophylle totale au niveau de la plante entière. Il apparaît que la teneur en chlorophylle totale croît très vite durant la période hivernale - printanière. Elle passe de 1.168 ± 0.19 mg/g MF pendant l'hiver à 3.196 ± 0.24 mg/g MF durant le printemps où elle marque sa teneur maximale. Elle décroît aussi vite pour la période printemps - été, où elle atteint une valeur de 1.221 ± 0.13 mg/g MF durant la saison estivale. La teneur en chlorophylle totale augmente ensuite jusqu'à 2.869 ± 0.08 mg/g MF, valeur moyenne enregistrée durant la saison automnale.

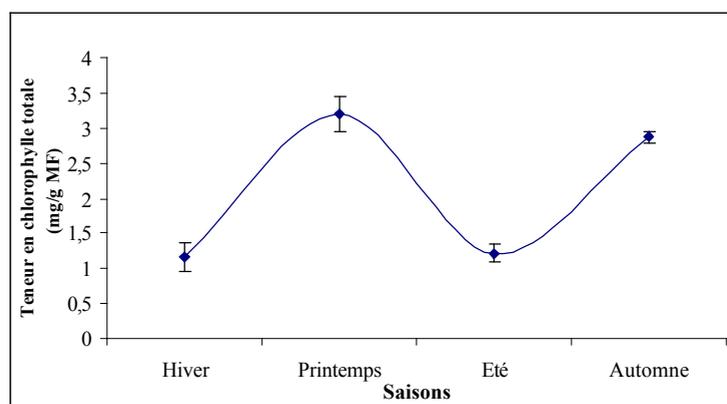


Fig.84 : Cumul saisonnier de la teneur en chlorophylle totale au niveau des aiguilles des semis de pin d'Alep en conditions naturelles

La détermination de la teneur des aiguilles de pin d'Alep en chlorophylle totale, a mis en évidence deux pics de production photosynthétique, un printanier (3.196 ± 0.24 mg/g MF) et l'autre automnal (2.869 ± 0.08 mg/g MF). La moyenne calculée pour les quatre saisons est de 2.114 ± 1.06 mg/g MF.

Il est possible de distinguer, à partir des valeurs moyennes de concentrations, les périodes extrêmes. En prenant en compte la plante entière, nous obtenons les regroupements suivants :

Tab.23: Importance des marqueurs biochimiques étudiés durant les saisons de l'année

Marqueurs biochimiques	Maximum	Minimum
Proline	<i>Été</i>	<i>Automne</i>
Sucres solubles	<i>Hiver</i>	<i>Été</i>
Chlorophylle totale	<i>Printemps</i>	<i>Hiver</i>

La proline marque un maximum durant la saison estivale tandis que les sucres solubles ne présentent plus un maximum estivale mais plutôt hivernale, alors que la chlorophylle totale est préférentielle en printemps (Tab. 23).

3.6- Variation de la résistance stomatique en fonction de la température :

La résistance stomatique a été suivie chez les semis de pin d'Alep soumises à des traitements thermiques de 38°C, 40°C, 42°C et 44°C (Fig.85).

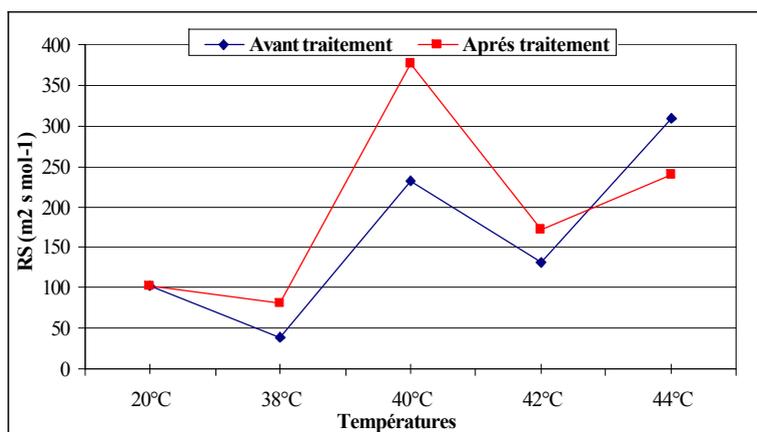


Fig.85 : Résistance stomatique des aiguilles des semis de pin d'Alep avant et après l'application des stress thermiques

L'application du stress thermique se manifeste par une modification importante des échanges gazeux à la suite du contrôle stomatique, ce qui peut traduire une fermeture des bandes stomatiques comme une adaptation à la contrainte thermique. La valeur maximale de la résistance stomatique est observée chez les plantes soumises à des températures de 40°C, où elle atteint la valeur de $376.66 \text{ m}^2 \text{ s mol}^{-1}$ (Fig.85).

En condition de contraintes thermiques prononcées, les bandes stomatiques se ferment pour s'opposer à la perte d'eau par la transpiration avec une augmentation très importante de la

résistance stomatique. Comme le nombre des stomates est plus élevé sur la partie inférieure des aiguilles que dans la partie supérieure et puisque la résistance stomatique dépend de la longueur de diffusion stomatique ainsi que de la densité stomatique et du degré d'ouverture de l'ostiole, on peut comprendre cette évolution classique de ce paramètre pour les différents traitements thermiques appliqués.

3.6.1- Evolution journalière de la résistance stomatique :

Les mesures de la résistance stomatique permettent de quantifier globalement le poids des contraintes environnementales et le comportement de l'espèce. La figure 86 nous montre l'évolution de la résistance stomatique au cours d'une journée ensoleillée de printemps (le 04 Mai 2008).

L'évolution de la résistance stomatique (Fig.86) suit une courbe classique. Cette évolution est caractérisée par une augmentation depuis le lever du soleil pour atteindre une valeur maximale à 12 heures où elle commence à décroître pour atteindre des valeurs minimales en fin d'après midi. Globalement, la mesure en continu des échanges gazeux au niveau foliaire montre que la fermeture stomatique est progressive et proportionnelle à la température et l'éclairement.

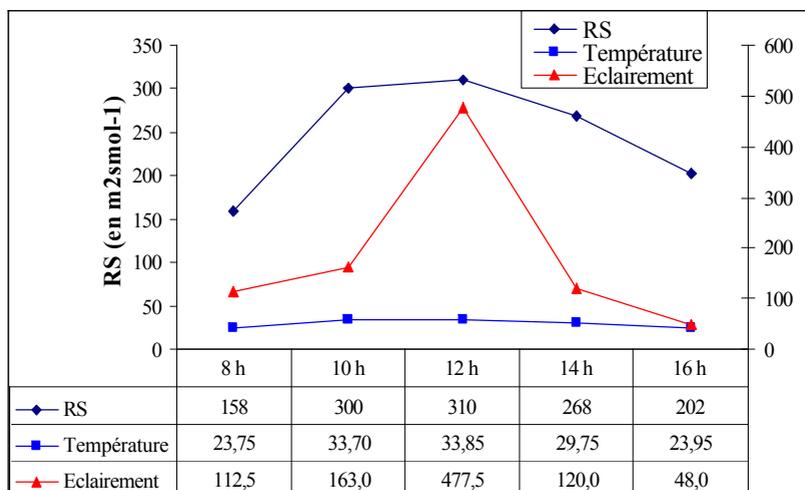


Fig.86 : Evolution journalière de la résistance stomatique (le 04-05-2008)

D'après les mesures effectuées sur les deux faces de l'aiguille, on constate que la face inférieure, généralement mieux pourvue en stomates transpire d'avantage. Pour les mesures du mois de Juin 2008, on remarque une grande amplitude de fermeture et d'ouverture des bandes stomatiques. Donc la résistance stomatique varie d'une façon irrégulière avec la température et l'éclairement au cours de cette journée (Fig.87). Lorsqu'il y a une contrainte thermique, les

bandes stomatiques se ferment partiellement ou totalement pour limiter la transpiration (à 12heures).

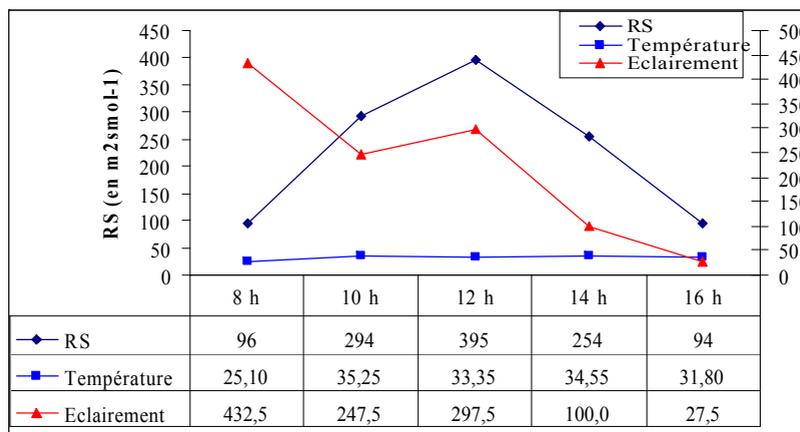


Fig.87 : Evolution journalière de la résistance stomatique (le 15-06-2008)

3.6.2- Relation entre la température et la lumière avec la résistance stomatique:

Les figures 88a et 88b présentent respectivement les relations entre la température et la lumière avec la résistance stomatique.

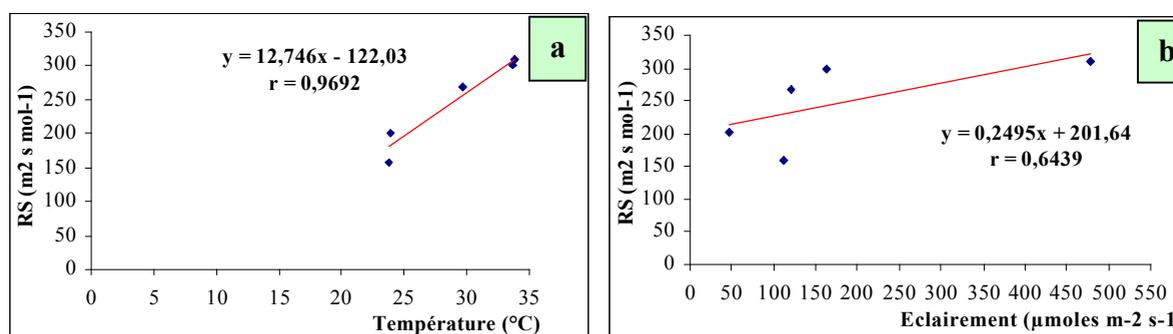


Fig.88 : Relation entre la résistance stomatique et la température (A) et la lumière (B)

Un coefficient de corrélation, estimé à 0.969, indique la présence d'une forte corrélation positive entre la température et la résistance stomatique (Fig.88a). Ainsi, une corrélation moins marquée existe entre la lumière et la résistance stomatique avec un coefficient de corrélation estimé à 0.644 (Fig.88b).

Chapitre 4 : Effet des variations thermiques saisonnières sur les paramètres morphologiques :

Un des objectifs de ce travail est la quantification de la croissance aérienne et racinaire au cours des saisons, ainsi que la répartition de la biomasse entre les différentes parties de la plante. Les mesures pratiquées concernant les paramètres suivantes : longueur de la partie aérienne (LPA), longueur de la partie racinaire (LPR), poids sec de la partie aérienne (PSA) ainsi que le poids sec de la partie racinaire (PSR).

4.1- Longueur de la partie aérienne (LPA) :

La figure 89 montre l'évolution de l'allongement caulinaire au cours des saisons. Les résultats montrent que la croissance en hauteur est progressive durant les quatre saisons de l'année. La courbe d'évolution de la hauteur se caractérise par un démarrage moyen durant la période hivernale atteignant en moyenne 11.68cm, suivie par une augmentation remarquable durant la période printanière et estivale (18.70 et 33.36cm respectivement).

La figure 90 présente les taux de croissance aérienne durant les quatre saisons de l'année. Globalement, la longueur la plus élevée est notée chez les semis pendant l'été avec un taux de croissance de 44.42% par rapport à la croissance totale, alors que la saison hivernale montre le taux le plus faible (12.32%).

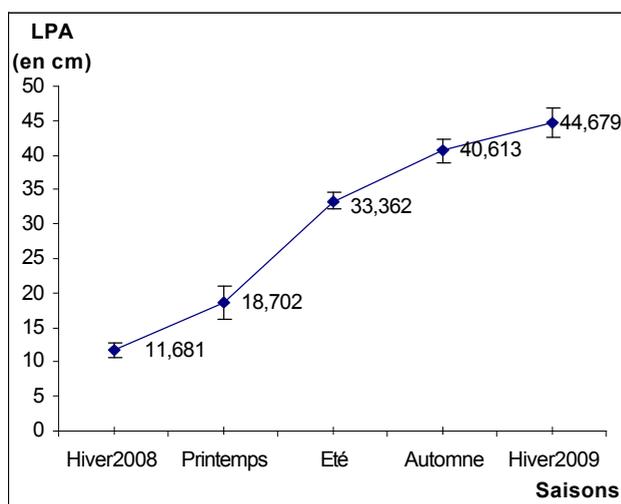


Fig.89 : Evolution saisonnière de la longueur de la tige

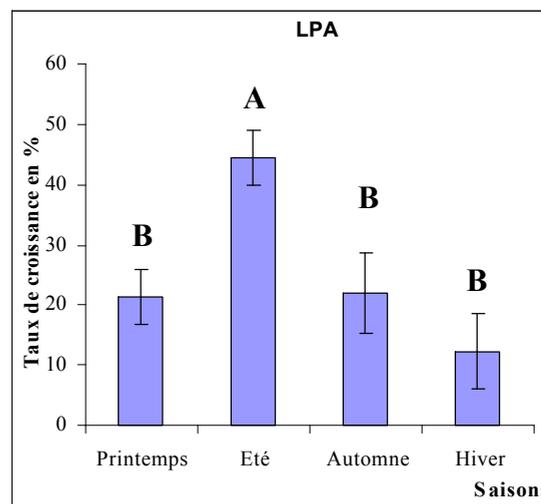


Fig.90 : Taux de croissance de la tige en fonction des saisons

L'analyse de la variance à un critère de classification révèle l'existence d'un effet très hautement significatif des saisons sur l'allongement de la tige ($p=0.000$) (Annexe 5 ; Tab.9).

Les comparaisons des moyennes réalisées par le biais du test de Newman et Keuls au seuil de 5%, nous isolent deux groupes distincts, où on note que le premier groupe (A) correspond à la saison estivale avec un taux de croissance maximale (44.43%), alors que la saison automnale, printanière et hivernale sont affectées au deuxième groupe (B) qui présente les plus faibles taux de croissance (21.97%, 21.27% et 12.32% respectivement) (Annexe5 ; Tab.10).

A partir des mesures saisonnières, on constate que la vitesse d'allongement de la tige n'est pas constante au cours de l'année et présente un maximum estival (Fig.91).

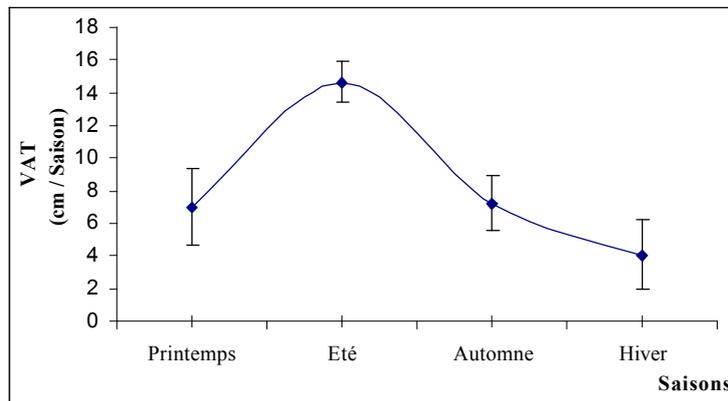


Fig.91 : Vitesse d'allongement de la tige en fonction des saisons

4.2- Longueur de la partie racinaire :

La longueur cumulée des racines durant les quatre saisons de l'année est illustrée par la figure 92. On remarque que la courbe de croissance racinaire présente une allure sensiblement identique avec celle des tiges. Les racines des semis de pin d'Alep gagnent durant la période estivale 18.9cm (soit un taux de 49.26%) alors que ce gain est égale à 3.14cm pour la saison hivernale (soit un taux de croissance de 8.18%). En effet, l'analyse de la variance à un critère signale une différence très hautement significative en fonction des saisons ($p=0.000$) (Annexe5, Tab.9).

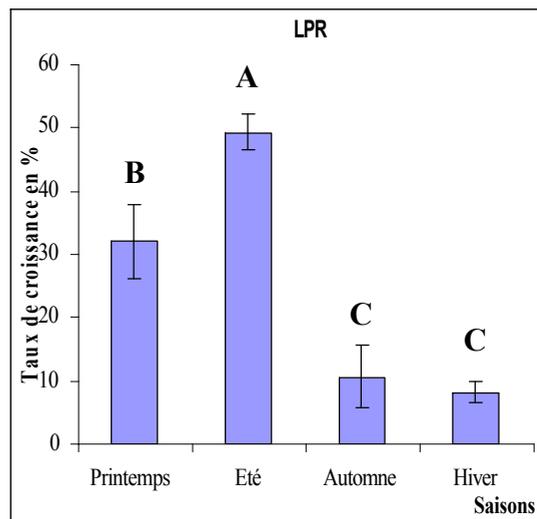
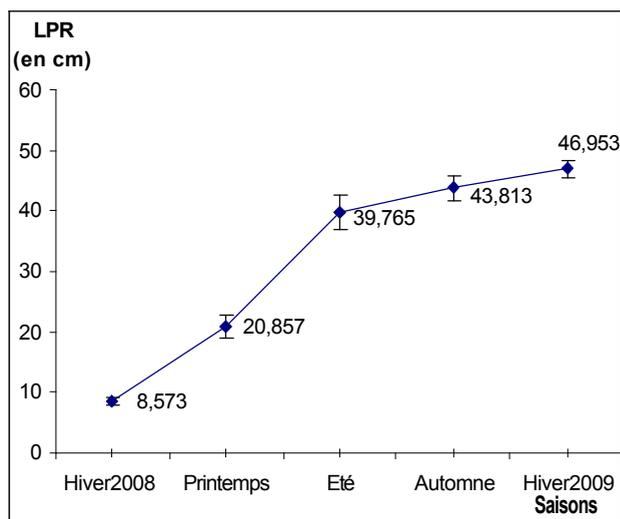


Fig.92 : Evolution saisonnière de la longueur racinaire

Fig.93 : Taux de croissance racinaire en fonction des saisons

Le test de Newman et Keuls au seuil de 5% donne trois groupes homogènes où la saison estivale occupe le premier groupe (A) avec la moyenne la plus élevée (49.26%), le deuxième groupe (B) englobe la saison printanière (32%), le troisième groupe (C) englobe la saison automnale et hivernale avec les plus faibles moyennes (10.54% et 8.18% respectivement) (Annexe5 ; Tab.10).

La photo suivante montre que les racines des semis de pin d'Alep sont très développées durant la période estivale, contrairement à l'hiver.



Photos 3 : Développement de la partie racinaire des semis de pin d'Alep après la saison hivernale (à gauche) et estivale (à droite)

La figure 94 montre que la vitesse d'allongement racinaire suit la même évolution que celle de la tige, elle augmente rapidement après la saison printanière jusqu'à la fin de l'été où il atteint la vitesse maximale d'allongement (18.9cm/saison).

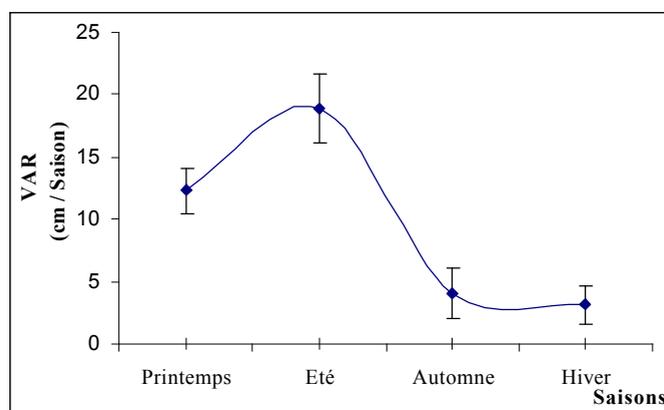


Fig.94 : Vitesse d'allongement racinaire en fonction des saisons

4.3- Rapport de la longueur partie racinaire / longueur partie aérienne (LPR/LPA) :

La valeur la plus élevée du rapport (LPR/LPA) est notée chez les semis pendant la saison estivale avec une valeur maximale de 1.194 suivie par celle de la saison printanière (1.136), ce qui traduit une allocation de la biomasse vers les racines durant ces deux saisons. En revanche, la partie racinaire reste stable pour les saisons hivernale (1.053) et automnale (1.082) (Fig. 95).

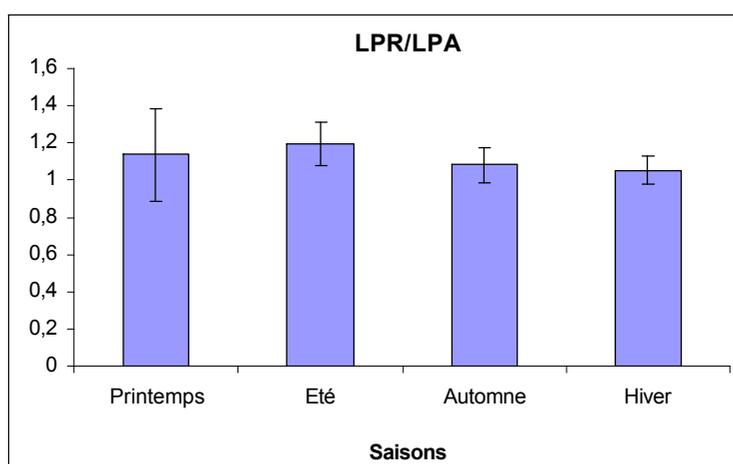


Fig.95 : Variation saisonnière du rapport (LPR / LPA) des semis de pin d'Alep en conditions naturelles



Photos 4 : Développement des semis de pin d'Alep après la saison hivernale (à gauche) et estivale (à droite)

4.4- Poids sec de la partie aérienne (PSA):

Les modifications enregistrées sur le poids sec de la partie aérienne des semis de pin d'Alep, sont assez variables suivant les saisons considérées (Fig.96). D'après la figure 97, le poids sec de la partie aérienne des semis de pin d'Alep accuse une augmentation remarquable au cours des saisons. Le gain en poids sec le plus élevé est noté chez les semis pendant l'été (7.41g/saison) soit un taux de croissance maximale de l'ordre de 45.87%.

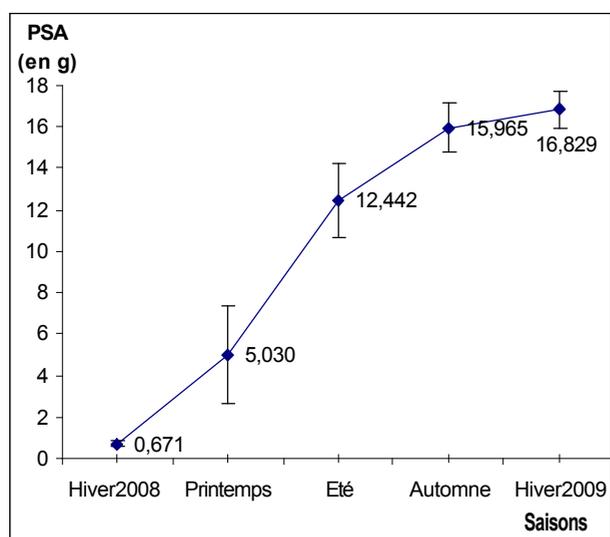


Fig.96 : Evolution du poids sec de la partie aérienne en fonction des saisons

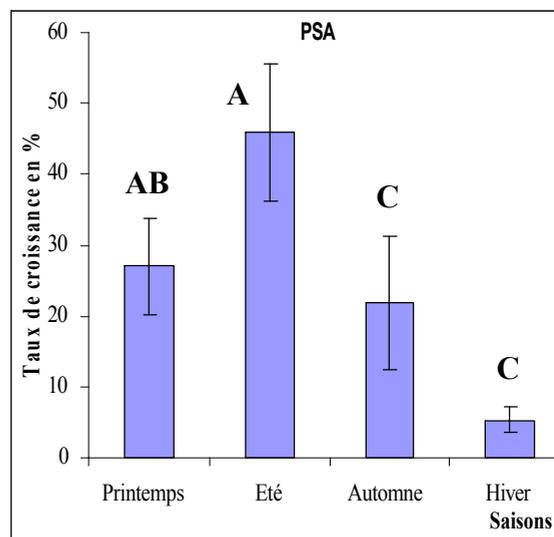


Fig.97 : Taux d'évolution de la biomasse sèche de la partie aérienne en fonction des saisons

Des effets hautement significative ont été relevés sur la variation du poids sec de la partie aérienne en fonction des saisons ($p=0.008$) (Annexe5, Tab.9). Ces résultats sont vérifiés par le biais du test de Newman et Keuls qui fait ressortir trois groupes de moyennes

homogènes. Le premier (A) comporte la saison estivale avec le taux le plus élevé (45.87%), le deuxième groupe intermédiaire (AB) comprend la saison printanière (26.97%), le dernier groupe (B) englobe les saisons automnale et hivernale avec les taux les plus faibles (21.80% et 5.34% respectivement) (Annexe5 ; Tab.10).

4.5- Poids sec de la partie racinaire (PSR):

Pour ce paramètre morphologique, le taux d'augmentation le plus élevé est enregistré au cours de la saison estivale avec un gain de 50.79% alors que le taux le plus faible est affiché par la saison hivernale avec seulement 5.51% (Fig.99). L'analyse de la variance montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les saisons pour le paramètre poids sec de la partie racinaire ($p=0,211$) (Annexe 5; Tab.9).

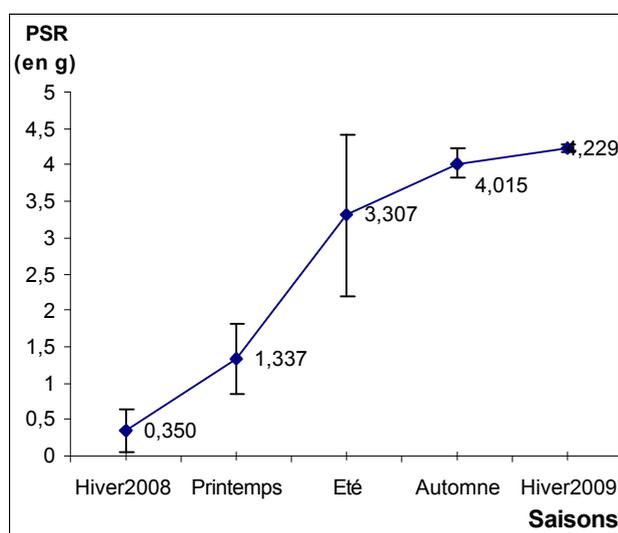


Fig.98 : Evolution du poids sec de la partie racinaire en fonction des saisons

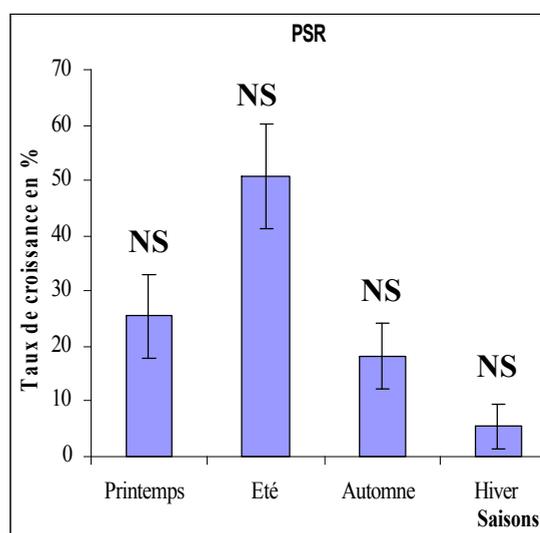


Fig.99 : Taux d'évolution de la biomasse sèche du système racinaire en fonction des saisons

4.6- Taux relatif de croissance (TRC) :

La variation saisonnière a eu des effets significatifs sur la croissance des plants de pin d'Alep (Fig.100). Ceci est confirmé par l'analyse de la variance à un critère de classification qui montre qu'il existe une différence hautement significative entre les saisons ($p=0.003$) pour le paramètre TRC (Annexe5 ; Tab.9).

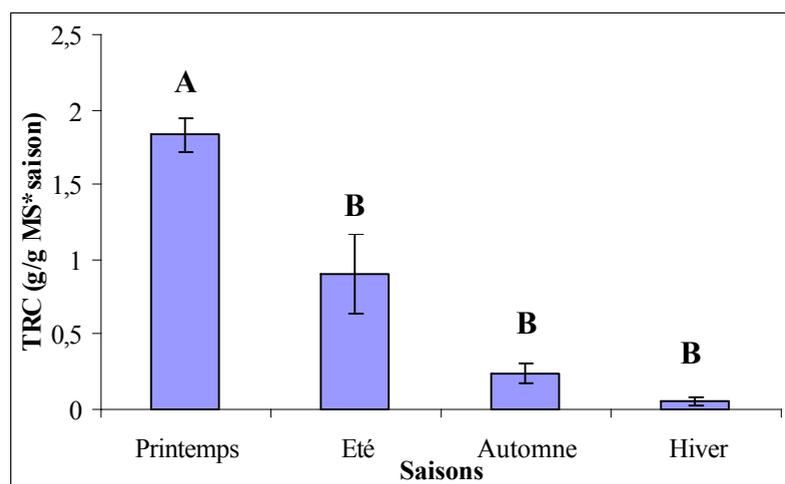


Fig.100 : Variation saisonnière du taux relatif de croissance total (TRC)

D'après la figure 100, on constate que le taux relatif de croissance total (TRC) est de 1.83 ± 0.112 g/g MS durant la saison printanière et diminue par la suite pour atteindre une valeur de 0.906 ± 0.266 g/g MS pendant la saison estivale, par la suite, ce taux diminue progressivement et significativement durant la période automnale-hivernale.

La comparaison des moyennes révèle l'existence de deux groupes homogènes pour le facteur saison où le premier groupe (A) comprend la saison printanière avec la plus forte valeur de TRC (1.823 g/gMS), le second (B) englobe la saison estivale, automnale et hivernale avec les plus faibles moyennes (0.951 g/gMS, 0.242 g/gMS et 0.053 g/gMS respectivement) (Annexe 5 ; Tab.10).

4.7- Rapport de biomasse (PSR/PSA):

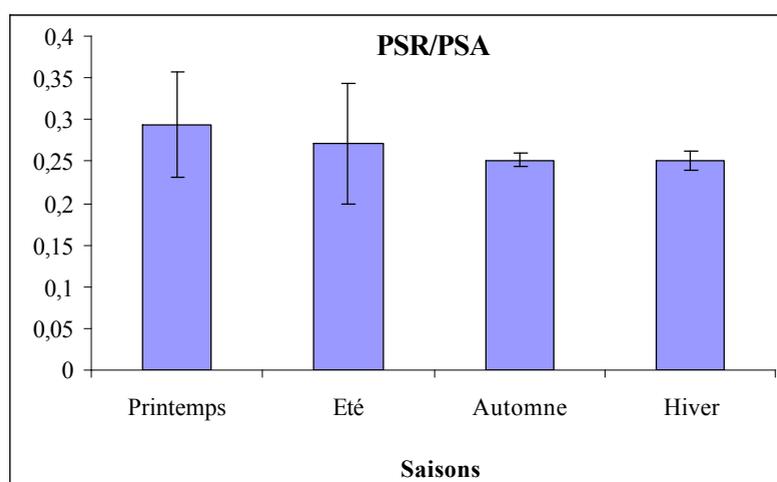


Fig.101 : Variation saisonnière du rapport (PSR / PSA)

D'après cette figure, on remarque que le rapport de la biomasse sèche (PSR/PSA) est presque identique pour les quatre saisons de l'année. Durant les saisons hivernale et automnale, les valeurs de ce rapport sont proches de 0.252; donc la partie racinaire est 4 fois moins développée pour les semis durant ces deux saisons. Par contre le rapport (PSR/PSA) le plus important est signalé pour les semis durant la saison printanière (0.294), traduisant ainsi la supériorité de la partie aérienne de ces plantes par rapport au système racinaire.

4.8- Corrélation entre les paramètres morphologiques :

Cette matrice a pour objet de tester les liaisons qui peuvent exister entre les variables morphologiques.

Tab.24 : Matrice de corrélation entre les variables morphologiques

Variables	LPA	LPR	PSA	PSR	LPR/LPA	PSR/PSA	TRC
LPA	1						
LPR	0,772	1					
PSA	0,785	0,832	1				
PSR	0,439	0,558	0,397	1			
LPR/LPA	-0,090	0,541	0,278	0,236	1		
PSR/PSA	-0,076	-0,043	-0,196	0,659	-0,010	1	
TRC	0,231	0,618	0,587	0,353	0,663	-0,061	1

Au seuil de 5%, les valeurs des coefficients de corrélation r qui relient les différentes variables sont comprises entre 0.587 ($p < 0.05$) et 0.947 ($p < 0.05$) témoignant d'une corrélation significative et fortement positive entre les variables (Tab.24). La longueur de la tige est positivement corrélée à celle de la racine ($r=0.772$), au poids sec de la partie aérienne. Ainsi, la longueur racinaire est positivement corrélée au poids sec aérien.

4.9- Taux de mortalité :

Dans le but de voir l'influence des variations thermiques saisonnières sur la survie des plants des semis de pin d'Alep, nous avons effectué un comptage des plants morts afin de déterminer le taux de mortalité de ces plants durant chaque saison de l'année.

Tab.25: Taux de mortalité des semis de pin d'Alep en fonction des saisons

Saisons	L'hiver	Printemps	Eté	Automne
Taux de mortalité (%)	8	2.12	2.32	0

Le taux de mortalité le plus élevé est enregistré durant la saison hivernale avec 8% cependant durant la saison automnale ce taux est nul (Tab.25).

4.10- Discussion :

Pour mettre en évidence les potentialités d'adaptation du pin d'Alep aux contraintes thermiques, deux expérimentations ont été réalisées sur les semis, l'une par l'application des traitements thermiques de hautes et de basses températures, l'autre par le suivi de sa réponse éco-physiologique aux variations thermiques saisonnières de la région de Sétif à partir des marqueurs biochimiques tels que la proline, les sucres solubles, les protéines et la chlorophylle.

L'examen des résultats saisonniers montre que la teneur des semis de pin d'Alep en sucres solubles durant la saison hivernale est nettement supérieure à celle des autres saisons. Cette période est dominée par la fréquence des stress où les basses températures s'échelonnent entre 2 et -4°C avec une durée totale de 228 heures. Cependant, la saison d'été correspond aux plus faibles teneurs en sucres solubles. De leur côté, le pin d'Alep se présente comme l'espèce la plus riche en hydrates de carbone en hiver et la moins riche en été. L'augmentation de la teneur en sucres solubles dans les organes des semis de pin d'Alep testés durant la saison hivernale, serait peut être le résultat d'une dégradation accrue de l'amidon au cours de cette saison.

Lors de la croissance, le glucose provenant de l'hydrolyse du saccharose est référentiellement utilisé pour la synthèse de l'amidon tandis que le fructose s'accumule (Beruter *et al.*, 1997 in Travers, 2004).

Les travaux de Jung et Smith (1961) ont permis de caractériser l'accumulation des hydrates de carbone pendant l'acclimatation au froid de la luzerne et du trèfle rouge. Le pourcentage d'hydrates de carbone totaux non structuraux (HCN) s'accroît pendant l'automne, atteint un maximum entre décembre et février et diminue progressivement jusqu'au printemps.

Smith *et al.*, (1979) in Travers (2004) montrent aussi que l'augmentation des températures estivales favorise l'accumulation de l'amidon et retarde son hydrolyse tandis que les basses températures nocturnes au cours de la période de maturation accélèrent la dégradation. Ceci est en accord avec nos résultats.

Ainsi, dans une étude sur *Arabidopsis thaliana*, Wanner et Junttila (1999) montrent que l'acclimatation au froid chez cette espèce s'avère strictement corrélée à la concentration

des sucres solubles (principalement: saccharose, glucose et fructose) qui augmente immédiatement après le passage à 1°C à la lumière. Une température nocturne de 1°C ralentit la consommation des sucres par la respiration et maintient leur concentration élevée dans la feuille.

La teneur des semis de pin d'Alep en proline montre qu'elles sont très adaptées aux conditions du milieu. A l'exception de la saison estivale, la variation saisonnière de la teneur en proline des plantes est corrélée à celle des sucres solubles pendant les autres saisons. Cependant durant la saison estivale, les semis de pin d'Alep accumulent différemment ces deux métabolites où on a enregistré une forte accumulation de la proline et une faible concentration en sucres solubles.

L'accumulation simultanée ou non de ces deux solutés suivant le degré de stress, permet aux plantes de supporter les températures extrêmes. Le processus de concentration des sucres solubles et ou de la proline dans les tissus foliaires des plantes stressées est reconnu comme une caractéristique d'adaptation (Kameli et Losel, 1995).

Toutefois, durant la saison printanière et estivale, on remarque une accumulation significative de la proline. Cette augmentation pourrait être attribuée au développement des plants pendant ces deux saisons et de leurs besoins en composés azotés, dont la proline, qui en cas de besoin, représente l'un des composés les plus facilement mobilisables.

Laplante (2003) montre que l'exposition des plants aux premières gelées déclenche la seconde étape adaptative qui consiste en un ensemble de changements métaboliques permettant une tolérance maximale au froid. Entre autres, l'amidon est converti en glucides simples solubles, ce qui contribue à abaisser la température de cristallisation en augmentant la concentration de solutés (surfusion). C'est à ce moment que le métabolisme favorise l'accumulation des glycoprotéines qui se lient aux molécules d'eau et améliorent ainsi la résistance à la déshydratation.

L'augmentation de la teneur en proline pourrait s'expliquer comme une conséquence de la dégradation des protéines ou tout simplement comme une réponse au stress thermique, enregistrée durant ces saisons, que subissent les semis de pin d'Alep.

La réduction des taux des sucres solubles durant la saison estivale témoigne de sa forte translocation vers les organes en pleine croissance, pour y être métabolisé et servir à d'autres besoins. Cela explique le rythme rapide de croissance des plants durant la saison estivale.

Quant à la teneur foliaire en chlorophylle totale c'est durant la saison printanière et automnale qui correspond les taux les plus élevés. En fonction des organes, la plus grande quantité de la chlorophylle est enregistrée au niveau des aiguilles des anciennes pousses.

La chlorophylle présente des fluctuations entre les quatre saisons de l'année. Une baisse importante des teneurs est enregistrée durant la saison hivernale et estivale tout en restant inférieures à celles enregistrées pendant la saison printanière et automnale. Parmi les causes possibles expliquant cette inhibition, la destruction des membranes thylakoïdiennes cellulaires : une perte de la compartimentation cellulaire peut en effet inhiber le déroulement des grandes fonctions métaboliques. Il est apparu que l'enveloppe du chloroplaste est plus résistante à la température que les membranes formant les thylacoïdes : c'étaient donc bien les processus se déroulant à l'intérieur du chloroplaste qui seraient endommagés par les températures élevées (Cornic, 2007).

En effet, la matrice des corrélations réalisée pour les paramètres biochimiques saisonnières (Tab.22), révèle des corrélations négatives et très hautement significatives entre la teneur en proline et la teneur en chlorophylle « a » (avec $r = -0,646$), la teneur en chlorophylle « b » ($r = -0.819$) et la teneur en chlorophylle totale ($r = -0.704$), c'est-à-dire plus la teneur en proline s'accumule dans les organes, plus les teneurs en chlorophylle « a », « b » et chlorophylle totale s'abaissent.

Les résultats saisonniers montrent le caractère thermophile des semis de pin d'Alep, qui ont répondu aux stress thermique liés à la saison d'été, par augmentation de leurs teneurs en proline, alors qu'on explique l'abaissement des concentrations de sucres par leur stockage sous une forme complexe en substances de réserves, ce qui va de pair avec l'augmentation des taux de matière sèche.

Parallèlement à ces résultats, les traitements thermiques à basse température ont un effet significatif sur les paramètres biochimiques mesurés. L'accumulation des solutés (proline et sucres solubles) dépend étroitement du traitement thermique appliqué et de la nature de l'organe. Les résultats montrent que les traitements thermiques à -6°C et -10°C ont

induit une accumulation remarquable des sucres solubles et même de la proline dans les organes des semis de pin d'Alep. Cette accumulation est plus importante au niveau des tiges et les deux pousses. Par contre la température +2°C provoque des taux d'accumulations faibles par rapport aux autres traitements thermiques. Ces résultats montrent l'existence d'une liaison positive entre la teneur en proline et la teneur en sucres solubles ($r= 0.624$).

En outre, nous remarquons que les plantes stressées ont réagi aussi par l'accumulation des protéines au niveau des différents organes. La teneur la plus élevée est observée chez les semis traitées à -6°C pour les anciennes pousses, et -10°C pour les autres organes testés.

Pour le traitement le plus sévère (-10°C), l'augmentation des teneurs en protéines atteint : 281.48%, 330.23, 177.27 et 217.77%, par rapport au témoin, respectivement dans les aiguilles des anciennes et jeunes pousses, les tiges et les racines. La matrice de corrélation révèle l'existence d'une corrélation positive entre les teneurs en sucres solubles et les teneurs en protéines avec une valeur de $r= 0.609$.

Un grand nombre de protéines induites par les stress environnementaux ont la caractéristique d'être thermostables et plusieurs d'entre elles ont été identifiées chez les graminées à la suite de l'exposition à des températures froides (Lin et Thomashow, 1992). Le rôle cryoprotecteur de ces protéines proviendrait de la protection contre la déshydratation cellulaire, du maintien du transport des métabolites cellulaires et de la protection de l'intégrité de certaines protéines (Houde *et al.*, 1995).

Toutefois, une augmentation de la concentration des protéines totales durant l'endurcissement au froid a été documentée chez plusieurs plantes (Davis et Gilbert, 1970 ; McKenzie *et al.*, 1988). En plus de représenter une réserve azotée assurant la reprise printanière, les protéines pourraient jouer un rôle important dans la tolérance au gel des plantes pérennes.

Pour les teneurs en chlorophylles, après l'application des traitements thermiques à basse température, on note une baisse de la chlorophylle totale par rapport au témoin. Cette diminution s'accroît au fur et à mesure que la température appliquée diminue : à -6°C elle atteint 67.11% pour les anciennes pousses et 68.73% au niveau des jeunes pousses, alors avec le traitement le plus sévère (-10°C), la baisse de la teneur en chlorophylle totale est estimée à 57.15% pour les anciennes pousses et 62.75% pour les jeunes pousses par rapport au témoin.

Parallèlement à l'augmentation de la teneur en proline sous l'effet du stress, une baisse dans les teneurs en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a et b) a été, en revanche, enregistrée. Cette diminution est plus marquée chez les pousses adultes que chez les jeunes pousses. Ces résultats suggèrent l'existence d'une connexion vraisemblable entre les voies de biosynthèse des pigments chlorophylliens et de la proline. Une compétition entre ces deux composés sur leur précurseur commun, le glutamate, peut être à l'origine de cette évolution (Bengston *et al.*, 1978 in Tahri *et al.*, 1988).

Ainsi, Tahri *et al.*, (1988) ont confirmé que la baisse de l'activité de l'enzyme Glutamine synthétase (GS) semble être relativement proportionnelle à la baisse des teneurs en pigments chlorophylliens et inversement proportionnelle aux teneurs de proline accumulée et que la biosynthèse des pigments chlorophylliens serait, en toute vraisemblance, liée à l'activité GS. Ces pigments utiliseraient le glutamate produit notamment par cette enzyme.

La matrice des corrélations réalisée pour les paramètres biochimiques (Tab.13), montre des corrélations négatives, très hautement significatives entre la teneur en proline et la teneur en chlorophylle totale ($r = -0.879$), et même entre la teneur en sucres solubles et la teneur en chlorophylle totale ($r = -0.747$). On note aussi que les teneurs en protéines sont négativement corrélées aux teneur en chlorophylle totale ($r = -0.901$). C'est-à-dire plus les teneurs en proline, en sucres solubles et en protéines s'accumulent dans les organes, plus les teneurs en chlorophylle totale s'abaissent et vis vers ça.

Concernant les traitements thermiques à haute température, les résultats obtenus montre l'accumulation de la proline, des sucres solubles et des protéines au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep. Elle suggère une forte accumulation des sucres solubles et même des protéines chez les semis qui ont subi un traitement thermique à 44°C. Cependant, on constate que la température appliquée 42°C a occasionné une forte accumulation de la proline au niveau des différents organes des semis de pin d'Alep. Pour ce traitement thermique, on a signalé une augmentation de l'ordre de 963.97% au niveau des anciennes pousses, et de 1285.67% au niveau des jeunes pousses, de 878.37% au niveau des tiges, alors que les racines ont gagné plus de 1306% par rapport au témoin.

Ces résultats suggèrent une corrélation importante entre le métabolisme azoté et carboné. En effet, pour les traitements à haute température, l'accumulation de la proline est accompagnée d'une importante concentration des sucres solubles. Ces résultats confirment

ceux de Laouar (1977) qui a montré qu'au niveau de la feuille, l'accumulation de la proline semble être reliée au facteur lumière et à un niveau important de glucides.

Les sucres et l'amidon stockés dans les organes pérennes peuvent servir de réserves tampons, lesquelles sont mobilisées lorsque le carbone fixé par la photosynthèse devient insuffisant aux besoins instantanés de la plante. La répartition du carbone nouvellement fixé et du carbone des réserves est déterminée par la force de puits relative des divers organes (Keller *et al.*, 1995 in Castelan-Estrada, 2001).

En effet l'accumulation des sucres solubles dans les conditions climatiques chaudes a été signalée par plusieurs auteurs. Elle est considérée comme un facteur déterminant du niveau de tolérance chez les végétaux. Barlow *et al.*, (1976) montrent que la présence des sucres solubles en période de chaleur et de sécheresse protégerait les thylakoïdes de l'altération irréversible des membranes et exercerait une action favorable sur la résistance protoplasmique à la sécheresse.

Pour notre étude, la concentration des sucres solubles est plus importante au niveau des tiges par rapport à la partie racinaire. Ce ci est en désaccord avec les résultats obtenus par Williams (1996) et Zapata (1998) qui montrent que l'amidon et les sucres solubles sont plus abondants dans les racines que dans le tronc de la vigne, et confirment le rôle prépondérant des racines comme organe de stockage des glucides.

Hare *et al.*, (1998) suggèrent que sous stress la proline est transférée à partir des cellules sources, qui possèdent la capacité de synthétiser la proline, vers des cellules cibles qui ont une forte demande en énergie. Ober et Sharp (1994) mentionnent que l'ABA est nécessaire pour l'accumulation de la proline sous faible potentiel. L'ABA joue probablement un rôle de régulateur dans le transport de la proline inter-sites, source et utilisateur (Ober et Sharp, 1994).

Les semis de pin d'Alep ont répondu aux conditions de stress thermique par une hausse dans le niveau de protéines aussi bien pour les aiguilles des anciennes pousses qu'au niveau racinaire. De ce fait les teneurs les plus élevées sont enregistrées pour les plants traités thermiquement à 44°C avec des taux d'augmentation qui varient de 510.18% à 860% respectivement au niveau des anciennes pousses et des racines, alors que les teneurs chez les plants traités à la température 38°C sont faibles par rapport aux autres traitements thermiques

(soit un taux d'augmentation de 212% pour les aiguilles des anciennes pousses, 198% pour les aiguilles des jeunes pousses, 224% pour les tiges et 337% pour les racines)

Cette augmentation est due à une activation d'un ensemble de gènes permettant la synthèse des protéines spécifiques associées aux stress tel que les protéines « LEA » qui assurent une protection de l'ensemble vitale des protéines cellulaires et les protéines de choc thermiques (HSP) qui permettent un maintien des structures protéiques et membranaires de la cellule végétale (Baker *et al.*, 1988).

Nos résultats sont confirmés avec celles de Zivy (1987) qui indique qu'une trentaine de HSP sont synthétisées systématiquement en réponse à un choc thermique de 3 heures chez le blé tendre.

Les résultats de nombreuses études laissent supposer que les HSP sont impliquées dans des mécanismes de tolérance à hautes températures (Lindquist, 1986; Nagao, 1989). Ainsi Downs *et al.*, (1998) montrent que, chez une grande variété des plantes, la production des HSP de faible poids moléculaire est corrélée à la capacité de tolérer la chaleur.

En général, la proline reste un bon marqueur pour les températures chaudes et indique la limite thermique de -6°C pour les basses températures. Les sucres solubles marquent très bien la capacité d'endurcissement des semis. Ainsi, l'accumulation des protéines est surtout foliaire et importante en période estivale.

Concernant la chlorophylle, la diminution des teneurs en pigments chlorophylliens au niveau des deux pousses des semis de pin d'Alep s'accroît avec le traitement thermique appliqué. Cette baisse des teneurs en chlorophylle totale, décelée dans les tissus photosynthétiques, peut atteindre -76% pour le traitement thermique à 44°C. Nos résultats concordent avec ceux de Graham et McDonald (2001), à partir de travaux réalisés sur deux génotypes de blé soumis à un stress thermique, qui montrent que la haute température a réduit la concentration en chlorophylle des deux génotypes.

Les hautes températures accélèrent le dessèchement des feuilles et interviennent aussi spécifiquement sur la physiologie, notamment en inhibant la photosynthèse puis en dégradant les pigments, en particulier les chlorophylles (Bréda et Dreyer, 2003). Parmi les causes possibles expliquant cette inhibition, la destruction des membranes thylakoïdiennes

cellulaires. C'étaient donc bien les processus se déroulant à l'intérieur du chloroplaste qui seraient endommagés par les températures élevées (Cornic, 2007).

On peut noter aussi que les plants qui accumulent plus de proline sont aussi ceux qui connaissent la plus forte diminution des teneurs en pigments chlorophylliens et vice versa. L'analyse de la matrice de corrélation montre que les teneurs en proline après les traitements thermiques à haute température sont positivement corrélées aux teneur en sucres solubles ($r=0.887$) et au teneur en protéines ($r=0.829$), mais elles sont négativement corrélés à la chlorophylle totale ($r=-0.924$) (Tab.14).

En ce qui concerne la régulation stomatique des échanges foliaires, on déduit que l'application du stress thermique a entraîné une augmentation de la résistance stomatique selon le stress thermique. Ainsi, l'ouverture stomatique est fortement réduite pour les plantes soumises à un stress thermique sévère de 40°C où la résistance stomatique atteint la valeur de 376.66 m²smol⁻¹.

Chez les plantes stressées par les hautes températures, l'augmentation de la résistance stomatique, est due essentiellement, à la réduction de la pénétration du CO₂, limitée par une fermeture des stomates, avec pour conséquence une augmentation de la résistance de la feuille à la diffusion du CO₂. Ce comportement peut alors constituer un mécanisme d'adaptation aux conditions écologiques du milieu aride, caractérisés par des températures relativement élevées.

L'élévation de la température augmente la transpiration. Au-delà, les bandes stomatiques se ferment et n'assurent plus de refroidissement du feuillage par évaporation et les températures des aiguilles peuvent alors devenir supérieures à la température de l'air. Nous pouvons conclure que la température et la résistance stomatique varient dans le même sens.

Concernant l'évolution journalière de la résistance stomatique, on note que la résistance stomatique varie d'une façon irrégulière avec la variation thermique et l'éclairement au cours de la journée. Beyschlag *et al.*, (1990) signalent que les feuilles des plantes qui réduisent leur résistance stomatique au milieu de la journée ne ferment que quelques stomates, alors que les autres restent ouverts. Cette uniformité de la réaction des stomates a lieu quand les plantes sont exposées à des stress rapides, mais normalement les

stomates répondent d'une façon uniforme quand le stress a lieu d'une façon progressive. Ainsi, Bezzala (2005) montre aussi que les réponses stomatiques au stimulus lumineux varient selon l'espèce, le stade de développement, de la feuille et des conditions de cultures.

En ce qui concerne les paramètres morphologiques, l'allongement des tiges, la croissance racinaire, la biomasse aérienne et racinaire ont été suivi pendant les quatre saisons de l'année chez les semis de pins d'Alep exposés aux conditions naturelles pour mettre en évidence les potentialités d'adaptation de cette espèce aux variations thermiques saisonnières.

L'étude des rythmes de croissance verticale a permis de mettre en évidence une période hivernale à croissance faible, cela peut être due à l'effet des conditions climatiques exceptionnelles (228 heures de stress enregistrées par les basses températures hivernales) qui ont une influence sur la croissance de la partie aérienne et racinaire. En effet, le taux de croissance aérienne et racinaire est respectivement de l'ordre de 12.32% et 8.18% pour les semis durant la saison hivernale.

Ces résultats montrent que les parties aériennes et racinaires sont plus sensibles sous l'effet des basses températures hivernales. Ceci a été démontré par des études réalisées sur le pin d'Alep par Abed (1992) et Chaba (1991) in Bezzala (2005) dans la région d'Alger et Djelfa qui ont mis en évidence une croissance faible à nulle de cette espèce durant la période hivernale du fait des basses températures à la surface du sol.

Ainsi, Guyon (1986) a étudié l'influence du climat sur l'expression des composantes de la croissance en hauteur chez le pin noir (*Pinus nigra*). Les résultats obtenus montrent que les plus faibles élongations moyennes des entre-nœuds correspondent aux températures minimales les plus faibles. Le même auteur a signalé que les deux paramètres climatiques affectant généralement la croissance en hauteur de la plupart des conifères sont les facteurs hydrique et thermique.

Selon Serre-Bachet (1976)a, (1976) b; Nicault (2001), la reprise de la végétation chez le pin d'Alep est relativement tardive et se situe entre février et mars. Dans notre étude le taux de reprise est amélioré durant la saison printanière et atteint une valeur maximale durant l'été grâce à une forte activité photosynthétique. Ainsi, Gonzalez *et al.*, (2005) montrent qu'avec une élévation de la température, la vitesse de développement augmente en période de croissance et diminue en période de repos hivernal.

Ces résultats sont en accord avec celles de Vennetier (2005) qui signale que la croissance des arbres de pin d'Alep en hauteur et en diamètre commençant très tôt en fin d'hiver en région méditerranéenne, elle était très avancée en mai lorsque les conditions de température et de stress hydrique exceptionnelles se sont manifestés.

Les pins sont des espèces polycycliques qui présentent donc deux pousses annuelles. La croissance dépendant de processus biologiques complexes comme la photosynthèse, la migration des sucres, les mouvements de l'eau dans le tronc (Poupon, 1970).

Ainsi, Serre-Bachet (1976)a, (1976) b; Nicault (2001), suggèrent que les mois de Mai et Juin correspondent à la période de croissance radiale et apicale maximale des semis de pin d'Alep, ceci est en accord avec nos résultats.

De tels résultats ont déjà été mentionnés au cours de la synthèse bibliographique de Poupon (1970) qui signale que le pin d'Alep pousse au cours de l'été et que certains individus ne cessaient de croître au mois de septembre ou même en octobre.

Fernandez *et al.*, (2003) ont étudié les effets de la température sur la croissance et le développement des semis de Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Les résultats obtenus montrent que la croissance en hauteur est arrêtée lorsque la température minimale atteint 9 °C.

En effet, l'analyse de la matrice de corrélation réalisée pour les paramètres morphologiques, révèle une corrélation positive entre la hauteur de la partie aérienne et la longueur racinaire ($r= 0.772$).

La biomasse sèche peut être définie comme le reflet des réserves accumulées préalablement et résultent de l'activité photosynthétique (Mazlaik, 1982). Pour notre résultat la comparaison des valeurs moyennes de la biomasse sèche montre que la production de la matière sèche est fortement affaiblie par les conditions de l'hiver. Cette diminution de gain en biomasse chez les semis de pin d'Alep est affectée de façon similaire les deux parties de la plante avec des taux de croissance relativement identique (5.34% pour la partie aérienne et 5.51% pour la partie racinaire).

Le fort gain de la biomasse aérienne sèche est toujours enregistré chez les semis durant la saison estivale. Cela peut être expliqué par l'activité photosynthétique très importante qui assure un niveau du rendement satisfaisant et donc un gain en biomasse sèche aérienne au

niveau de nos jeunes plants. Ackermann *et al.*, (1992) ont constaté qu'au cours de la phase de croissance cellulaire durant la saison printanière et estivale, correspondant à la phase de stockage des glucides, le taux de biomasse sèche augmente régulièrement, ceci est en accord avec nos résultats.

Nous avons également noté une certaine régulation de la croissance de la partie aérienne et du système racinaire de la plante qui est aussi un moyen d'adaptation aux variations thermiques saisonnières. Les résultats obtenus montrent une allocation privilégiée de carbone au compartiment racinaire durant la saison estivale et printanière. A l'inverse, nous n'observons pas ce type d'allocation pour les autres saisons de l'année. Ces résultats concordent avec les travaux réalisés par Albouchi *et al.*, (2003) in Bezzala (2005) qui montrent une réduction en hauteur et biomasse sèche totale et une allocation de biomasse vers les racines, au détriment des parties aériennes des jeunes plants de *Casuarina* soumises à des stress hydriques sévères.

Le pin d'Alep supporte beaucoup plus mal les conditions climatiques hivernales. Sa mortalité est élevée durant cette saison (8 %), il souffre des températures fraîches enregistrées durant cette saison (228 heures de stress). Cependant il réagit bien à l'élévation des températures estivales puisqu'il s'allonge bien au cours de l'été, à une période où les températures ont dépassé le seuil de 34°C. En général, il est très bien adapté à la région de Sétif et résiste beaucoup aux conditions climatiques estivales.

Conclusion

CONCLUSION

Le suivi de l'état physiologique et morphologique des plantes sous un stress environnemental est essentiel pour une meilleure productivité des cultures. Ce travail s'articule sur la caractérisation de la réponse des semis de pin d'Alep aux températures extrêmes.

Les paramètres biochimiques mesurés saisonnièrement traduisent une tolérance aux conditions thermiques:

- Les basses températures de la saison hivernale et les hautes températures de la saison estivale ont induit une très grande accumulation de la proline au niveau des différents organes. En effet, les gelées tardives enregistrées durant la saison printanière provoquent aussi une augmentation de cet acide aminé. Pour les organes, les teneurs les plus élevées sont enregistrées au niveau de jeunes pousses et les tiges et les faibles teneurs sont affichées au niveau racinaire.

- Une augmentation de la teneur en sucres solubles chez les semis durant la saison hivernale et printanière par rapport aux plants témoins. Cependant l'accumulation des sucres solubles est faible durant la saison automnale et estivale mais il présente toujours un taux élevé par rapport au témoin. On note que la plus forte accumulation est observée au niveau des jeunes pousses et des tiges par rapport aux d'autres organes. De leurs côtés, les semis de pin d'Alep se présentent comme l'espèce la plus riche en hydrates de carbone en hiver et la moins riche en été.

- La chlorophylle totale se trouve aussi limitée pendant la saison hivernale et estivale alors que les saisons printanières et automnales présentent des variations positives par rapport au témoin. La distribution est plus élevée dans les aiguilles des anciennes pousses.

Ainsi, les analyses biochimiques de la proline, des sucres solubles, des protéines et de la chlorophylle, effectuées après l'application des traitements thermiques (hautes et basses températures), permettent de mieux comprendre les fluctuations de ces marqueurs biochimiques et leur circulation dans les semis de pin d'Alep. Parmi ces résultats :

- Le dosage de la proline a montré que les basses et les hautes températures appliquées ont entraîné l'accumulation de cet acide aminé chez les semis de pin d'Alep. Cette accumulation s'accroît au fur et à mesure que le niveau de stress devient plus sévère.

- Les sucres solubles ont aussi connus une augmentation de la concentration en réponse au stress thermique. Cette augmentation est très remarquable au niveau des tiges que les autres organes.

- En plus de l'accumulation de ces deux osmolytes, les semis de pin d'Alep ont répondu aux conditions stressantes par une hausse dans le niveau des protéines totales aussi bien au niveau des aiguilles des anciennes pousses qu'au niveau des racines. Donc l'accumulation des protéines dépend étroitement du traitement thermique appliqué et de la nature de l'organe.

- Pour la chlorophylle, les hautes et les basses températures entraînent une chute progressive en pigments chlorophylliens. Cette diminution s'accroît avec l'intensité du traitement thermique appliqué.

D'après les marqueurs biochimiques, le pin d'Alep réagit positivement et fortement à la température de 42°C pour les températures chaudes et -6 à -10°C pour les températures froides. On peut dire que le pin d'Alep est adapté aux variations thermiques extrêmes enregistrées dans la région de Sétif avec un éventail thermique compris entre -10°C et plus de 42°C.

D'autre part, le maintien, chez les plants stressés par les hautes températures, de la résistance stomatique à des valeurs plus élevées que celles des plants témoins témoigne d'une meilleure régulation stomatique chez les semis de pin d'Alep et atteste chez ces derniers d'une certaine tolérance aux contraintes thermiques. Ceci est confirmé par les mesures de l'évolution journalière de la résistance stomatique qui montrent que les valeurs maximales de la résistance stomatique sont observées autour de midi, ce qui traduit par une réaction de la plante à la variation thermique journalière et témoigne d'une fermeture quasi totale des bandes stomatiques.

Concernant les paramètres morphologiques, l'effet du stress thermique est très hautement significatif pour la plupart des variables analysées. En effet, nous avons constaté que le meilleur résultat obtenu sur la croissance en hauteur, la croissance racinaire, la

biomasse aérienne et même racinaire est noté chez les semis durant la saison estivale. Par contre les conditions climatiques sévères de la saison hivernale induisent une réduction de la vitesse d'allongement des tiges et des racines et même une diminution du gain de la biomasse aérienne et racinaire.

Au terme de cette étude et à travers les résultats obtenus, nous avons noté que le pin d'Alep présente une meilleure adaptation au climat semi-aride et que les semis ont utilisé les mêmes stratégies de tolérance vis-à-vis du stress thermique, mais la seule différence concerne le taux de synthèse des marqueurs étudiés, ces derniers peuvent avoir des implications importantes dans la capacité d'adaptation du pin d'Alep aux variations climatiques.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- Abrol Yash P., Ingram Keith T (1997).** Les effets de la hausse des températures diurnes et nocturnes sur la croissance et les rendements de certaines plantes cultivées. Archive de documents de la FAO. pp394-398
- Ackermann J., Fisher M., Amando R (1992).** Changes in sugars, acids and amino acids during ripening and storage of apples (cv. Glockenapfel). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 40, 1131-1134.
- Ahrens, M.J and Ingram, D.L. (1988).** Heat tolerance of citrus leaves. Hort Sci. 23: 747-748.
- Albouchi A., Sebeï H., Mezni M Y et Hédi El Aouni M (2001).** Influence de la durée d'acclimatation sur l'endurcissement à la sécheresse d'Acacia cyanophylla Lindl. Ann. For. Sci. 58 (2001). p 521
- Amutha R., Muthulaksmi S., Baby Rani W., Indira K. and Mareeswari P (2007).** Physiological Studies on Evaluation of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Genotypes for High Temperature Stress. Journal of Agriculture and Biological Sciences, 3(4): 245-251
- Bagnouls F et Gausson H (1957).** Les climats biologiques et leur classification. Ann.Géog.Fr.355. pp 193-220.
- Baker J., Steel CH et Dure IL (1988).** Sequence and characterization of 6 LEA proteins and their genes from cotton. Plant Mol Biol 11:277-291
- Barbéro M., Loisel R., Quezel P., Richardson D.M. et Romane F (1998).** Pines of the Mediterranean Basin. (éd. RICHARDSON D.M.), Cambridge University Press, pp 153-170.
- Barlow, E.W.R., L. Boersma, J.L. Young (1976).** Root temperature and soil water potential effects on growth and soluble carbohydrates concentration of corn seedlings. Crop Sci., 16, 59-62.
- Bedel J (1986).** Aménagement et gestion des peuplements de pin d'Alep dans la zone méditerranéenne française. Option Méditerranéennes. Série étude CIHEAM 86/1; 127-156
- Belkhodja M et Bidai Y (2007).** Analyse de la proline pour l'étude de la résistance d'une halophyte *Atriplex halimus* L. à la salinité. Laboratoire de Physiologie Végétale. Université d'Oran Algérie. pp5
- Bellinger Y and Larher F (1987).** Proline accumulation in higher plants. Plant physiology (life Sci.Adv), 6, 23-27.
- Bellinger Y., Bensaoud, A et Lahrer P (1989).** Physiological accumulation: a trait of use to breeding for stress tolerance. In ACEVEDO, CONESA, MONNEVEUX & SRIVASTAVA (Eds): Physiology breeding of winter cereals for stressed Mediterranean environments. Colloque n° 55, July 3-6, 1989, Montpellier, France, pp. 449-458.
- Berry J., Bjorkman O (1980).** Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. Ann Rev Plant Phys 31, 491-543

Beyschlag W., Pfanzen H (1990). A fast method to detect the occurrence of nonhomogeneous distribution of stomatal aperture in heterobaric plant leaves. Experiments with *Arbutus unedo* L. during the diurnal course. *ecologia* 1990; 82 : 52-55.

Bezzala A (2005). Essai d'introduction de l'arganier (*Argania spinosa* (L) Skeels) dans la zone de M'doukel et évaluation de quelques paramètres de résistance à la sécheresse. Mémoire de magistères en sciences agronomiques. Université de Batna. 107p.

Blum A et Ebercon A (1976). Genotypic responses in sorghum to drought stress. III. Free proline accumulation and drought resistance. *Crop Science*, 16, pp. 428-431.

Boudy P (1955). Economie forestière Nord africaine. Tome : 4. Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie Ed. Larose, 453p

Bréda Nathalie et Dreyer Erwin (2003). Sécheresse et canicule : Conséquences sur les peuplements forestiers. Information santé des forêts. Département de la Santé des Forêts.p6

Bula, R. J. et D. Smith. (1954). Cold resistance and chemical composition in over wintering alfalfa, red clover, and sweet clover. *Agron. J.* 46: 397-401.

Castanguay Y., Nadeau P., Lechasseur P., and Chouinard L (1995). Differential accumulation of carbohydrates in alfalfa cultivars of contrasting winterhardiness. *Crop Sa*, 35: 509-519.

Castelan-Estrada Mepivoseh (2001). Répartition de la Biomasse chez *Vitis vinifera* L.; Rendement de Conversion du Rayonnement Solaire Global et Coûts Energétiques. Thèse doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon. P 56

Chakroune M.L (1986). Le pin d'Alep en tunisie. Options méditerranéennes. Série Etude CIHEAM 86/1; 25-27

Chamaillard Sylvain (2007). Variabilité de facteurs écophysologiques contrôlant la régénération de populations naturelles de peuplier noir (*Populus nigra* L.) en Loire moyenne dans le cadre des modifications climatiques actuelles. Département EFPA. Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques. Fascicule de thèses (Octobre 2007). p132

Chen H., Kuang D et J.Wang.(1995). Studies on selection and characterisation of a stress tolerant sugarcane cell line. *Chin.J.Biotechnol.*,11,2, p.939

Coll Lluis (2000). Mise en évidence expérimentale d'un contrôle stomatique de l'embolie chez le noyer hybride (*Juglans regia* ' *Juglans nigra*). Diplôme d'Etudes Approfondies de Biologie Forestière. Université Henri Poincare de Nancy I. p34

Come Daniel (1992). Les végétaux et le froid. HERMANN, Editeurs des sciences et des arts. pp78-103

Cornic G (2007). Effet des hautes températures sur la photosynthèse. Publication Février 2007. p42

Couhert B et Duplat P (1993). Le pin d'Alep. Rencontre forestiers-chercheurs en forêt méditerranéenne. La grande motte (34), 6-7 octobre 1993. Ed. INRA Paris 1993. Les colloques n°63, 125-147.

Crowe J.H and L.M. Crowe (1992). Membrane integrity in anhydrobiotic organisms: toward a mechanism for stabilizing dry cells. Dans: Somero, G.N., C.B. Osmond et C.L. Bolis (eds). Winter and life. Springer – verlag, New York, pp. 87-103.

Crowe J.H., Carpenter J.F., Crowe L.M. and Anchoadoguy T.I. (1990). Are freezing and dehydration similar stress vector? A comparison of modes of interaction of stabilizing solutes with biomolecules. *Cryobiology* 27: 219-231.

Daget Ph. (1977). Le bioclimat méditerranéen, caractères généraux et mode de caractérisation. *Végétation*, vol.34. pp 1-20

Davis D. L. and W. B. Gilbert, (1970). Winter hardiness and changes in soluble protein fractions of bermudagrass. *Crop Sci.* 10: 7-9.

Delauney, A.J. and D. P. S. Verma. (1993). Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *Plant J.* 4: 215-223.

DGF (2005). Superficies, potentialités, et bilan d'incendies des forêts algériennes. Rapport Février 2005. p8-9

Djebaili, S. (1984). Steppe algérienne, phytosociologie et écologie. OPU. Alger. pp10-23

Dörffling K. and Askman A (1989). Relationship between frost tolerance and formation of proline, abscisic acid and specific proteins in cold hardened winter wheat (*Triticum aestivum*) varieties. XII Eucarpia Congress. pp20

Dörffling K., Abromeit M., Bradersen U., Dörffling H., and Melz G.. (1998). Involvement of abscisic acid and proline in cold acclimation of winter wheat. In plant cold hardiness. Li and Chen Ed. Pergamon Press, New York. pp. 283-292.

Downs CA., Heckathorn SA., Bryan JK., Coleman JS (1998) The methionine-rich low-molecular-weight chloroplast heat shock protein: evolutionary conservation and accumulation in relation to thermotolerance. *Am. J. Bot.* 85, 175-183

Dubois J (1991). Les chocs thermiques et leur application. Amélioration des plantes pour l'adaptation au milieu. Ed: AUPELF-UREF John Eurotext Paris. pp159-162

Dubois M., Gillesk.L., Hamilton J., Reberg A and Smith F (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substance, analytical, chemistry. Vol 28 :14-15

Ducrey M (1981). Action des basses températures hivernales sur la photosynthèse du cèdre et du douglas. *Ann. Sci. Forest.*, 1981, 38 (3), 317-329

Duke S H et Doehlert D C (1981). Root respiration, nodulation, and enzyme activities in alfalfa during cold acclimation. *Crop Sci.* 21: 489-494.

Emberger L. (1955). Une classification biogéographique des climats. Rec.Trav.Labo.Bot.Géol et Zoo. Fac.Sc. Montpellier. pp 3-43

Fernández Manuel, Royo Antonio, Luis Gil and José A Pardos (2003). Effects of temperature on growth and stress hardening development of phytotron-grown seedlings of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.). Ann. For. Sci. Vol 60 (2003) 277–284.

Ghazi A et Lahouati R (1997). Algérie 2010. Sols et ressources biologiques. Inst. Nat. Etudes de Stratégie Globale. 45p.

Gonzalez L., Olmedo J., Cordova H., Aragon C.E., pinad rivas M., Rodreguez R, (2005). Effet d'un analogue de Brassinosteroïde sur plantules de FHIA 18 exposées à un stress thermique. Information Vol 14 N°01 p18.19.

Graham A.W. and McDonald G.K (2001). Effects of zinc on photosynthesis and yield of wheat under heat stress. Publication ASA (Australian Society of Agronomy), 2001, 2 (2), 119-132.

Graumlich L.J (1993). Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region. Revue canadienne de recherche forestière 23: 133-143.

Grieu Ph., Aussenac G., Larher F (1988). Sécheresse édaphique et concentrations en quelques solutés organiques des tissus foliaire et racinaire de trois espèces de conifères : *Cedrus atlantica* Manetti, *Pseudotsuga macrocarpa* (Torr) Mayr, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Ann.Sci. For (1988) 45 (4). P312

Guilioni Lydie., Tardieu François (1997). Effets des hautes températures sur la croissance végétative et le développement des organes reproducteurs chez le pois (*Pisum sativum* L., cv. Messire). Thèse doctorat. p65.

Guyon J.P. (1986). Influence du climat sur l'expression des composantes de la croissance en hauteur chez le pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* Arn. ssp *nigricans*). Ann. Sci. For., 1986, (43) 2, 207-226.

Guyot G., (1999). Climatologie de l'environnement, Edit. DUNOD ; Paris, 507 p.

Hamdane F., (1995). Les pinèdes d'Algérie, essai de synthèse syntaxonomique. Thèse d'Ing I.S.B. Université de Sétif. P12

Hare P.D., Cress W.A. and Van Staden J (1998). Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. Plant cell and environment 21:535-553.

Havaux Michel et Lannoye Robert (1985). Effets des basses températures positives sur les réactions photochimiques primaires de la photosynthèse du maïs (*Zea mays* L., cv. « LG 9 »). Agronomie, 1985, 5 (4), 331-337.

Heller R., Esnault R., Clance C (1989). Physiologie végétale. Nutrition. Tom1. 4^{ème} édition, p201

Hendry G (1993). Evolutionary origins and natural functions of fructans-dimatological, boigéographie and mechanistic appraïsal. New phyto. 93: 108-113.

Hopkins Wiliam G (2003). Physiologie végétale. Deuxième édition. pp 460-464

Houde M., Daniel C., Lachapelle M., Allard F., Laliberté S., and Sarhan F.. (1995). Immunolocalization of freezing –tolerance –associated proteins in the cytoplasm and nucleoplasm of wheat crown tissues. *Plant. J.* 8: 583-593.

Jones JR., Qualset CO. (1984). Breeding crops for environmental stress tolerance in applications of genetic engineering to trop improvement. Eds. Collins G B. and Petolino J G. Martinus Nijhoff, Junks publishers pp. 305-340.

Jung G A and Smith Dale (1961). Trends of Cold Resistance and Chemical Changes Over Winter in the Roots and Crowns of Alfalfa and Medium Red Clover. I. Changes in Certain Nitrogen and Carbohydrate Fractions. *Publication Agron J.*1961; 53: 359-364

Jung GA and Larson K.L. (1972). Cold, Drought and heat tolerance. In : *Alfalfa Science and Technology.* American Society of Agronomy, pp. 185-210

Kadik B. (1987). Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) en Algérie: écologie; dendrométrie, morphologie. Office des publications universitaires (Alger) 5-222p.

Kadik, B. (1983). Contribution à l'étude de pin d'Alep (*Pinus halpensis* Mill.) en Algérie, écologie, dendrométrie, morphologie. Thèse de doct. en sciences., USTHB. P 314.

Kaldy M. S and Freuman S (1984). Free amino acids in unhardened and cold –hardened winter wheat crowns. *J. Plant. Nut.* 7: 1103-1111.

Kameli A and Losel D.M (1995). Contribution of carbohydrates and other solutes to osmotic adjustment in weat leaves under water stress. *plant physiol*, 145, pp363-366.

King Anthony W., Gunderson Carla A., Post Wilfred M., Weston David J., Wuschleger Stan D(2006). Plant respiration in a warmer world. *Science*, 302, 36-37

Körner C (1999). Alpine plant life. Fuctional plant ecology of high mountain ecosystems. Springer, Berlin. 339pp.

Koster K. L and Lynch D.V (1992). Solute accumulation and compartmentation during the cold acclimation of Puna rye. *Plant physiol.* 98: 108-113.

Kramer P.J., et Boyer J.S (1995). Water relations of plants and soils. Academic Press, San Diego.pp27-29

Lanier L (1986). Précis de sylviculture. Edition E.N.G.R.E.F.Nany.p384

Laouar S (1977.). Caractéristiques écophysiologiques et aspects de l'économie de l'eau de l'olivier (*Olea europea* L.) et de l'oranger (*Citrus sinensis* L. Obsbeck). Thèse de doctorat d'État, Université de Paris-VII, pp 57-59

- Laplante Nathalie (2003)** .Paramètres climatiques engendrant le gel des bourgeons chez le Bleuete en Corymbe dans la région de Granby (Québec). Université du Québec à Rimouski Travail réalisé dans le cadre du cours *Climatologie* GÉO-250-01. pp13
- Lin C and Thomashow M F (1992)**. DNA sequence analysis of a complementary DNA for cold – regulated Arabidopsis gene cor 15 and characterization of COR 15 polypeptide. *Plant physiol.* 99: 519-525.
- Lindquist S (1986)**. Heat shock response. *Ann Rev, biochem* ; 55 : 15 -9 1.
- Livingston D. P., III. (1991)**. Nonstructural carbohydrate accumulation in winter oat crowns before and during cold hardening. *Crop Sci.* 31: 751-755.
- Livingston D. P., III. (1996)**. The second phases of cold hardening: freezing tolerance and fructan isomer changes in winter cereal crowns. *Crop Sci.* 36: 1568-1573.
- Lowry O H., Rosebrough N J., Farr A L., Randall R J. (1951)**. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol.Chem.* 193:265-275
- Mac Kinney G. (1941)**. Absorption of light by chlorophyll solution .*Biol.Chem.*, 140.315-322
- Mahan, J.R., Burke, J.J ., Orzech, K.A. (1987)**. The thermal Kinetic window as an indicator of optimum plant temperature. *Plant Physiol.*82 : 518-522.
- Mazliak P (1982)**. Physiologie végétale croissance et développement. Vol2. Ed.Herman, 461p.
- Mckenzie J. S., Paquin R., and Duke S. H (1988)**. Cold and heat tolerance. In: Hanson, A, Barnes, D. K., and Hill, R. R., Jr (eds) *Alfafa and alfafa improvement*. Agronomy monograph No. 29, ASA, Madison, WI, pp. 259-302.
- Messaili B (1995)**. Systématique des spermatophytes, Botanique. Cours destinés aux agronomes. O.P.U Alger, p19-20.
- Méthy M., Trabaud L (1990)**. Caractérisation de la résistance au froid de deux espèces sclérophylles méditerranéennes par la fluorescence de la chlorophylle. *Ann.Sci.For.*, 1990, 47, 141-148.
- Meyer S., Reeb C., Bosdeveix R (2004)**. Botanique : Biologie et physiologie végétale. Edition Maloine. p 163-164
- Meza–Basso L., Guarda P., Rios D., and Alberdi M (1986)**. Changes in free amino acid content and frost resistance in *Nothofagus dombeyi* leaves. *Phytochem.* 25: 1843-1846.
- Mezali M (2003)**. Rapport sur le secteur forestier en Algérie. 3^{ème} session du forum des nations unis sur les forêts.pp9
- Montero G Canellas I et Ruis-Peinado R (2001)**. Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Invest.Agr.Sist.Recur.For.*,10(1); 24p

- Nagao R.T (1989).** The heat shock response in plants : Short-term heat treatment regimes and thermotolerance. *Envir. Stress in plants. Series G: Ecol. Sciences*; 19 131-42.
- Nahal B (1986).** Taxonomie e aire géographique des pins du groupe halepensis. Option Méditerranéennes. Série Etude CIHEAM 86/1;1-9
- Nahal I (1962).** Le pin d'Alep. Etude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole. *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts* 19 (4) : 533-627.
- Naidu B. P., Paleg L. G., Aspinall D., Jannings A. C., and Jones G. P (1991).** Amino acid and glycine betaine accumulation in cold –stressed wheat seedlings. *Phytochem.* 30: 407-409.
- Nanjo T., Kobayashi M., Yosiba Y., Kakubarri Y., Yamaguchi – Shinozaki K., and Shinozaki K.. (1999).** Antisense suppression of proline degradation improves tolerance to freezing and salinity in *Arabidopsis thaliana*. *FEBS letters* 461: 205-210.
- Natarajan Seenivasan (2005).** High temperature stress responses of *Salvia Splendens* and *Viola X Wittrockiana*. Faculty of the Louisiana State University.152-161
- Nicault A., Rathgeber C., Tessier L. et Thomas A. (2001).** Croissance radiale et densité du bois du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en relation avec les facteurs climatiques. Analyse in situ de la mise en place du cerne. *Annals of Forest Sciences* 58: 769-784.
- Ober S., Sharp P. (1994)** Polyphasic chlorophylla fluorescence transients in plants and cyanobacteria. *Photosynthesis research* 29:147-150.
- Orcutt, D. M. et Nilsen E. T (2000).** The physiology of plants under stress. New-York, John Wiley and Sons, Inc. pp128
- Oukarroum Abdallah (2007).** Vitalité des plantes d'orge (*Hordeum vulgare* L.) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne. Thèse Doctorat. Faculté des sciences de l'Université de Genève. 184pp
- Parde J. (1957).** La production des forêts de pin d'Alep en France. *Ann. E.N.E.F, Vol.15 (2), pp369-417.*
- Pesci P and Beffagna A (1984).** Inhibiting effect of fusaric acid on abscisic acid induced proline accumulation in barley leaves. *Plant Sci. Letters*, 37, pp 7-12.
- Poupon H (1970).** Etude de la croissance en hauteur, et en circonférence de quelques espèces de pin et de eucalyptus dans l'arboretum de Zernia. *Annales de l'institut national de recherche forestières de Tunisie. I.N.R.F.T. - ARIANA - (Tunisie) Vol. 4 - Fasc. 5 1970. p5-28.*
- Quezel P (1980).** Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen. Dans : *Actualités d'Ecologie Forestière* (éd. : PESSON), édition Gauthier Villars, Paris, p. 205-256.
- Quezel P (1986).** Les pins du groupe "halepensis": écologie, végétation, écophysologie. Options méditerranéennes. Série Etude CIHEAM 86/1, 11-24

Ramade F (1994). Eléments d'écologie (écologie fondamentale). 2^e édition. Edi. Science International, Paris 1994. pp64, 65, 79-82, 373

Ramade F (2003). Eléments d'écologie, Ecologie fondamentale. 3^e édition. Paris. 690p

Richer C., Rioux, J A., Lamy, M P et Daigle G (2001) Winter damage on young plants of *Acer saccharinum* L. under different Canadian climatic conditions. *Canadian Journal of Plant Science* 81: 145-153.

RNE (2000). Rapport national sur l'état et l'avenir de l'Environnement. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Algérie. 253p.

Roussel L (1970). La notion de niveaux d'énergie et son intérêt en sylviculture, *Revue Forestière Française*, 2, 131.

Schulze Ernst-Detlf., Erwin Beck and Klaus Muller-Hohenstein (2002). *Plant ecology*. Springer. Allemagne. pp8-9

Schwab K B., Heber U (1984). Thylakoid membrane stability in drought-tolerant and drought-sensitive plants. 1984, vol. 161, n^o1, pp. 37-45.

Seigue A (1985). La forêt circumméditerranéenne et ses problèmes. Maison neuve et larose Edition. Paris. 502p

Senioniti E., Manetos Y., Gavales N.A (1986). Cooperative effects of light and temperature on the activity of phosphoenolpyruvate carboxylase from *Amaranthus paniculatus*. *Plant Physiol.* 82m 518-522.

Serre F (1973). Contribution à l'étude dendroclimatologique du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III, France, 236 p.

Serre-Bachet F (1976) a. Les rapports de la croissance et du climat chez le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). I - Méthodes utilisées. L'activité cambiale et le climat. *Acta Oecologica / Oecologica plantarum* 2 (2) : 143-171.

Serre-Bachet F (1976) b. Les rapports de la croissance et du climat chez le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). II - L'allongement des pousses et des aiguilles et le climat. Discussion générale. *Acta Oecologica / Oecologica plantarum* 2 (3) : 201-224.

Singh SP and Paleg LG (1985). Low Temperature-Induced GA₃ Sensitivity of Wheat Comparison of Low Temperature Effects on the Phospholipids of Aleurone Tissue of Dwarf and Tall Wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 12(3) 277 – 289.

Souleres G (1969): Le pin d'Alep en Tunisie: annales de l'Ins. Nat. Rech. Forest. Tunisie. Vol 2. Fasc.126 p.

Tahri E H., Belabed, A et Sadki K (1998). Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum*). *Bull. Inst. Sci.*, Rabat, n^o21 (1997-1998), pp. 81-87.

Tal, M and Rosenthal I (1979). Salt tolerance in *Simmondsia chenensis* water balance and accumulation of chloride sodium and proline under low and high salinity. *Ann. Bot.*, 34, pp. 701-708.

Touchard christelle (2006). Recherche de QTLs et choix de cibles stratégiques pour l'amélioration de la tolérance aux basses températures chez le maïs. Thèse doctorat. Université de technologie Compiègne (UTC). pp23-25

Travers Isabelle (2004). Influence des conditions pédoclimatiques du terroir sur le comportement du pommier et la composition des pommes à cidre dans le Pays d'Auge. Thèse de doctorat de l'université de CAEN / Basse-Normandie.p78-82

Troll W., Lindsley J., (1955). A photometric method for the determination of proline. *J.Boil.Chem.* pp215, 655-660.

Upadhyaya A., Davis T.D. and Sankhla M (1991). Heat shock tolerance and anti-oxidant activity in moth bean seedlings treated with tetacyclis. *Plant GrowthRegulation* 10: 215-222.

Vennetier Michel (2005). Changement climatique et forêt méditerranéenne. Info DFCI Bulletin du centre de documentation (Forêts méditerranéennes et incendie), Novembre 2005, n°55, p 1-5

Vijn I., Smeekens S (1999). Fructan: more than a reserve carbohydrate? *Plant Physiology* 120: 351–360.

Volenc J.J., Boyce P J., Hendershot K L (1991). Carbohydrate metabolism in taproots of *Medicago sativa* L. during winter adaptation and spring regrowth. *Plant physiology* 1991, vol. 96, n°3, pp. 786-793.

Wanner LA., Junttila O (1999). Cold induced freezing tolerance in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 120, 391-399

Williams L E (1996). Grape. *In: E. a. S. Zamski, A (ed.) Photoassimilate Distribution in lants and Crops.* Marcel Dekker, Inc., New York.

Zapata C (1998). Suivi pluriannuel de la mise en place et de la mobilisation des réserves carbonées et azoté chez 2 cépages de vigne présentant une sensibilité à la coulure. Institut National Agronomique Paris-Grignon. Pp69-77

Zitouni A (1991). Contribution à l'étude de l'influence des brise vents sur les facteurs climatiques et la production céréalière en Algérie : région des hautes plaines de Sétif. Thèse. Doctorat. Univ. Paris VII. 188 p.

Zivy M (1987). Genetic variability for heat shock proteins in common wheat. *Theor Appl Genet*, 74: 209- 13.

Annexes

ANNEXE 1 : Climat

Tab.1 : Régime annuel et saisonnier des pluies de la région de Sétif (1998-2007)

Années	Précipitation annuelles (mm)	Précipitations saisonnières (mm)				Régime saisonnier
		Hiver (H)	Printemps (P)	Eté (E)	Automne (A)	
1998	455,9	72,5	156,9	32,1	194,4	APHE
1999	384	162,1	32,1	30,3	159,5	HAPE
2000	331,3	72,9	112,3	44,2	101,9	PAHE
2001	251,7	107,9	41,1	4	98,7	HAPE
2002	371,5	114,1	62,3	79,5	115,6	HAEP
2003	584,1	230,5	144,6	95,5	113,5	HPAE
2004	492,6	162,1	176,5	49	105	PHAE
2005	368,8	120,1	65,8	64,6	118,3	HAPE
2006	394,5	143,8	140,2	48,4	62,1	HPAE
2007	419,7	41,2	218,6	38,6	121,3	PAHE
<i>Moy</i>	<i>405,41</i>	<i>122,72</i>	<i>115,04</i>	<i>48,62</i>	<i>119,03</i>	<i>HAPE</i>

Tab.2 : Estimation des températures pour la station de Choug Aissa (1462m) et Righa Dahra (1785m) à partir de la station de référence (Sétif : 1033 m) (Période 1998 – 2007).

Stations T(°C) Mois	Sétif			Station : Choug Aissa			Station : Righa Dahra		
	M	m	M+m/2	M	m	M+m/2	M	m	M+m/2
Décembre	10,01	2,94	6,48	7,01	1,22	4,12	4,75	-0,07	2,34
Janvier	9,82	2,07	5,95	6,82	0,35	3,59	4,56	-0,94	1,81
Février	10,95	2,52	6,74	7,95	0,80	4,38	5,69	-0,49	2,60
Mars	15,34	5,34	10,34	12,34	3,62	7,98	10,08	2,33	6,20
Avril	18,19	8,29	13,24	15,19	6,57	10,88	12,93	5,28	9,10
Mai	23,86	12,80	18,33	20,86	11,08	15,97	18,60	9,79	14,19
Juin	30,34	17,78	24,06	27,34	16,06	21,70	25,08	14,77	19,92
Juillet	33,91	20,87	27,39	30,91	19,15	25,03	28,65	17,86	23,25
Août	32,94	20,55	26,75	29,94	18,83	24,39	27,68	17,54	22,61
Septembre	26,98	16,10	21,54	23,98	14,38	19,18	21,72	13,09	17,40
Octobre	22,30	12,82	17,56	19,30	11,10	15,20	17,04	9,81	13,42
Novembre	14,15	6,18	10,17	11,15	4,46	7,81	8,89	3,17	6,03
Moyenne	20,73	10,69	15,71	17,73	8,97	13,35	15,47	7,68	11,57

Tab.3 : Variation annuelle du nombre des jours chauds ($T^{\circ}>34^{\circ}\text{C}$) et des jours de gelées de la région de Sétif

Années	N° jours de gelées	N° jours $T^{\circ}>34$
2000	19	31
2001	7	32
2002	13	23
2003	18	35
2004	20	36
2005	33	31
2006	22	25
2007	6	27

Tab.4 : Stress de froid de l'année 2005

Mois	Jours	Durée (en heures)	Poids (en°C)	Intensité (en °C/heure)
Décembre	21/12/04	6	0,2	0,03
	22/12/04	6	1,5	0,25
	23/12/04	6	0,7	0,12
	24/12/04	9	3,1	0,34
	25/12/2004	12	2,7	0,23
	Du 25/12/2004 au 26/12/2004	27	10,7	0,40
	27/12/2004	21	18,4	0,88
	28/12/2004	18	20,6	1,14
	29/12/2004	21	5,8	0,28
	30/12/2004	18	8,9	0,49
Janvier	04/01/2005	6	2,1	0,35
	05/01/2005	9	2,7	0,30
	06/01/2005	6	2,7	0,45
	08/01/2005	6	1,8	0,30
	09/01/2005	6	0,5	0,08
	10/01/2005	9	3,9	0,43
	11/01/2005	6	3,3	0,55
	13/01/2005	9	3,3	0,37
	15/01/2005	12	5,1	0,43
	16/01/2005	6	2,5	0,42
	19/01/2005	6	1,5	0,25
	20/01/2005	6	0,7	0,12
	Du 25/01/2005 au 29/01/2005	108	197,5	1,83
	Du 29/01/2005 au 1/02/2005	66	58,8	0,89
Février	2/2/05	15	4,3	0,29
	3/2/05	15	5,8	0,39
	4/2/05	6	1,4	0,23
	05/02/2005	9	1	0,11
	07/02/2005	9	3,4	0,38
	11/02/2005	12	8,7	0,73
	12/02/2005	9	3,1	0,34
	Du 14/02/2005 au 18/02/2005	99	113,4	1,15
	19/02/2005	21	16,8	0,80
	20/02/2005	15	6,5	0,43
	21/02/2005	9	5,3	0,59
	22/02/2005	12	4,4	0,37
	23/02/2005	15	8,2	0,55
	Du 27/02/2005 au 29/02/2005	36	15,7	0,44
Mars	2/3/05	9	0,8	0,09
	3/3/05	6	1,1	0,18
	5/3/05	9	1,5	0,17
	06/03/2005	12	10,9	0,91
	07/03/2005	12	6,6	0,55
	Du 7/3/05 au 9/3/05	42	43,9	1,05
	10/03/2005	9	2,7	0,30
Avril	10/4/05	12	5,4	0,45
	11/4/05	15	7,9	0,53

Tab.5: Stress de froid de l'année 2006

Mois	Jours	Durée (en heures)	Poids (en °C)	Intensité (en °C/heure)
Décembre	2/12/05	9	2,8	0,31
	10/12/05	15	8,7	0,58
	11/12/05	12	3,8	0,32
	12/12/05	12	8,1	0,68
	13/12/2005	6	1,6	0,27
	22/12/2005	9	4,2	0,47
	23/12/2005	9	4,2	0,47
	24/12/2005	9	4,3	0,48
	25/12/2005	12	4,2	0,35
	Du 29/12/2005 au 30/12/2005	18	10,5	0,58
Janvier	2/1/06	6	2,6	0,43
	3/1/06	12	2,5	0,21
	4/1/06	18	9,6	0,53
	5/1/06	18	9,8	0,54
	06/01/2006	15	11,8	0,79
	07/01/2006	15	7,5	0,50
	08/01/2006	9	2,2	0,24
	12/01/2006	9	1,4	0,16
	13/01/2006	12	2,1	0,18
	14/01/2006	9	3,6	0,40
	15/01/2006	12	6,5	0,54
	16/01/2006	12	5,9	0,49
	17/01/2006	9	3	0,33
	18/01/2006	12	5,8	0,48
	19/01/2006	6	1,6	0,27
	24/01/2006	12	4,4	0,37
	25/01/2006	18	11,2	0,62
	26/01/2006	18	16,7	0,93
27/01/2006	15	7,4	0,49	
Février	7/2/06	12	1,6	0,13
	8/2/06	12	6	0,50
	13/2/06	12	5,3	0,44
	14/2/06	9	5,3	0,59
	15/02/2006	6	2,2	0,37
	20/02/2006	6	2,7	0,45
	21/02/2006	6	0,9	0,15
	24/02/2006	9	2	0,22
	25/02/2006	15	10,1	0,67
	26/02/2006	12	3,8	0,32
	27/02/2006	9	3,2	0,36
28/02/2006	6	3,6	0,60	
Mars	3/3/06	6	0,7	0,12
	6/3/06	15	7	0,47
	7/3/06	15	10,9	0,73
	8/3/06	9	2,8	0,31
	11/03/2006	9	2,1	0,23
	14/03/2006	12	4,8	0,40

Annexes

Tab.6 : Stress de froid de l'année 2007

Mois	Jours	Durée (en heures)	Poids (en°C)	Intensité (en °C/heure)
Décembre	21/12/06	6	2	0,33
	24/12/06	6	1,2	0,20
Janvier	4/01/07	6	2,2	0,37
	24/01/07	12	7	0,58
	25/01/07	15	4,9	0,33
	26/01/07	9	2,5	0,28
Mars	10/03/07	9	3,5	0,39
	20/03/07	9	3	0,33
	Du 21/03/07 au 24/03/07	66	63,1	0,96
	24/3/07	9	1,9	0,21

Tab.7 : Stress de chaleur de l'année 2005

Mois	Jours	Durée (en heures)	Poids (en°C)	Intensité (en °C/heure)
Juillet	15/7/05	6	2,1	0,35
	16/7/05	9	7,3	0,81
	17/7/05	9	9	1,00
	18/7/05	6	6,1	1,02
	22/7/05	6	2,8	0,47
	24/7/05	9	6,2	0,69
	25/7/05	6	8,6	1,43
	26/7/05	9	6,9	0,77
	27/7/05	12	12	1,00
	28/7/05	12	16	1,33
	29/7/05	6	6,3	1,05
	31/7/05	9	4,9	0,54
	Août	1/8/05	9	8,7
9/8/05		9	5,5	0,61
10/8/05		6	3,8	0,63
11/8/05		6	3,9	0,65
16/8/05		6	1,6	0,27
17/8/05		6	4,7	0,78

Tab.8 : Stress de chaleur de l'année 2006

Mois	Jours	Durée (en heures)	Poids (en°C)	Intensité (en °C/heure)
Juin	23/6/06	6	2,2	0,37
	24/6/06	9	5,3	0,59
	25/6/06	6	4,2	0,70
	26/6/06	12	4,2	0,35
	27/6/06	9	6,7	0,74
	28/6/06	9	7,3	0,81
Juillet	3/7/06	6	4,6	0,77
	4/7/06	6	3,2	0,53
	27/7/06	6	0,7	0,12
	28/7/06	6	1,5	0,25
Août	1/8/06	6	2,5	0,42
	20/8/06	6	2,6	0,43
	23/8/06	6	1,4	0,23

Annexes

Tab.9: Stress de chaleur de l'année 2007

Mois	Jours	Durée (en heures)	Poids (en °C)	Intensité (en °C/heure)
Juin	19/6/07	9	7,3	0,81
	20/6/07	6	3,4	0,57
	21/6/07	6	2,3	0,38
	22/6/07	9	3,6	0,40
	23/6/07	9	5,6	0,62
	24/6/07	12	3,8	0,32
	25/6/07	9	4,8	0,53
Juillet	3/7/07	6	4,6	0,77
	4/7/07	6	3,2	0,53
	27/7/07	6	0,7	0,12
	28/7/07	6	1,5	0,25
Août	3/8/07	6	2,4	0,40
	19/8/07	6	2,4	0,40
	28/8/07	6	1,2	0,20
	29/8/07	6	1,2	0,20

Tab.10 : Principaux stress de froid enregistrés durant l'année 2007-2008

Mois	Jours	Durée (en heures)	Poids (en °C)	Intensité (en °C/heure)
Décembre	11/12/07	12	3,3	0,28
	13/12/07	15	6,8	0,45
	14/12/07	6	3,5	0,58
	15/12/07	9	1,5	0,17
	16/12/07	18	7,4	0,41
	17/12/07	21	26,5	1,26
	18/12/07	18	16,4	0,91
	19/12/07	12	2,7	0,23
	29/12/07	12	3,2	0,27
Janvier	01/01/08	12	5,4	0,45
	02/01/08	9	4,8	0,53
	13/01/08	9	4,6	0,51
	18/01/08	6	0,1	0,02
	25/01/08	9	8,9	0,99
	26/01/08	9	1,6	0,18
Février	09/02/08	9	5,1	0,57
	10/02/08	6	1,2	0,20
	18/02/08	6	1,4	0,23
Mars	Du 05/03/08 au 08/03/08	78	55,2	0,71
	09/03/08	12	1,9	0,16
	24/03/08	12	8,5	0,71
	25/03/08	6	2,1	0,35
Avril	05/04/08	9	2	0,22

Tab.11 : Principaux stress de chaleur enregistrés durant la saison estivale de l'année 2008

Mois	Jours	Durée (en heures)	Poids (en°C)	Intensité (en °C/heure)
<i>Juin</i>	23/06/08	6	1,8	0,30
	24/06/08	6	2,8	0,47
<i>Juillet</i>	05/07/08	6	3,7	0,62
	06/07/08	6	3,8	0,63
	07/07/08	9	7,1	0,79
	08/07/08	9	9	1,00
	09/07/08	9	9,1	1,01
	10/07/08	9	5	0,56
	11/07/08	6	5,6	0,93
	12/07/08	6	4,1	0,68
	20/07/08	6	0,6	0,10
	21/07/08	6	4,5	0,75
	25/07/08	6	0,5	0,08
<i>Août</i>	06/08/08	9	2,3	0,26
	07/08/08	6	2,4	0,40
	08/08/08	6	1,4	0,23
	12/08/08	9	5,1	0,57
	13/08/08	9	9,2	1,02
	14/08/08	6	3	0,50
	19/08/08	6	6,5	1,08

ANNEXE 2

1-Dosage de la proline :

La méthode suivie est celle de Troll et Lindsley (1955). Elle consiste à prendre 100 mg du matériel végétal puis placé dans un tube à essai. Un volume de 2 ml de méthanol à 40 % est ajouté à l'échantillon, le tout est chauffé à 85°C dans un bain-marie pendant une heure. Après refroidissement, on prélève 1 ml d'extrait auquel il faut ajouter : 2 ml d'acide acétique, 25mg de ninhydrine, 1ml de mélange contenant : 120ml d'eau distillée, 300ml d'acide acétique, 80ml d'acide orthophosphorique, le tout est porté à ébullition à 100°C pendant 30minutes. Après refroidissement, l'ajout de 5ml du toluène et l'agitation au vortex permet de distinguer deux phases (une phase supérieure est une phase inférieure). Après récupération de la phase supérieure, 5mg de sulfate de sodium oxydé (Na_2SO_4) sont ajoutés pour éliminer l'humidité. Après 48 heures, on détermine par spectrophotomètre la densité optique des échantillons à une longueur d'onde $\lambda = 528\text{nm}$. Les valeurs obtenues sont converties en teneur de proline à partir de la courbe d'étalon dont la relation est la suivante :

$$Y = \text{DO} \cdot 0.62 \text{ } \mu\text{mol/mgMS}$$

Y : teneur en proline

DO:densité optique.

MS : matière sèche

2-Dosage des sucres solubles

Les sucres solubles totaux sont dosés par la méthode Dubois *et al.*, (1956). Elle consiste à mettre 100 mg de matériel végétal dans des tubes à essai, on ajoute 3 ml d'éthanol à 80% pour faire l'extraction des sucres, puis on laisse à température ambiante pendant 48 heures à l'obscurité. Au moment du dosage, on filtre le contenu et on ajoute 20ml de l'eau distillée. Dans des tubes en verre, on met 1 ml de la solution à analyser, on ajoute 1 ml de phénol à 5 % puis on ajoute rapidement 5 ml d'acide sulfurique concentré à 1,86N puis on place les tubes au bain-marie pendant 15 à 20mn à une température de 30°C. La lecture de la densité optique est effectuée sur une longueur d'onde de 490nm.

Les teneurs en sucres solubles sont calculés par l'équation suivante :

$$Y=DO \ 1.657\mu\text{mol/mg MS}$$

La détermination de la matière sèche pour la proline et les sucres solubles est obtenue en transférant les résidus de l'extraction dans une étuve à 80°C pendant 24 heures

3-Dosage des pigments chlorophylliens :

La méthode utilisée est celle de Mac Kinney (1941). Elle consiste à prendre 100 mg de la matière fraîche composée des aiguilles de semis de pin d'Alep et placée dans un tube à essai. On ajoute ensuite 10ml d'une solution préparée à partir 75% d'acétone et de 25% d'éthanol. On les conserve dans des boîtes fermées pendant 48heures à 30°C et à l'obscurité. La densité optique est mesurée à 663nm pour la chlorophylle « a » et à 645nm pour la chlorophylle « b ».

Les concentrations en chlorophylle « a » et « b », exprimés en mg.g-1MF sont données par les deux formules suivantes :

$$\text{Chl (a) (mg/g MF)} = 12.3 \text{ DO (663)} - 0.86 (645)/10$$

$$\text{Chl (b) (mg/g MF)} = 9.3 \text{ DO (645)} - 3.6 (663)/10$$

4-Dosage des protéines :

La méthode utilisée est celle de Lowry (1951). Elle consiste à prendre 2 g du matériel végétal (aiguilles de la première et la deuxième pousse de croissance, tiges, racines), le broyage est effectué dans 1ml de soude 1M. A la fin du broyage 3ml de soude sont ajoutés, puis laisser en contact pendant 1h30mn à la température ambiante. Transvaser le broyat dans un tube à centrifugeuse et rincer le mortier soigneusement avec 2ml de soude 1M. Le très fin broyat obtenu est centrifugé pendant 10 minutes à 4000RPM, puis le surnageant recueilli est ajouté à 10ml dans une éprouvette (avec NaOH 1M).

La méthode de Lowry (1951) consiste à préparer 4 solutions :

- Solution A : solution de Na₂CO₃ à 2% (dans NaOH 0.1N)
- Solution B : Tartrate double de sodium et de potassium à 2%(dans l'eau distillé).
- Solution C : sulfate de cuivre (CuSO₄) à 1% (dans l'eau distillé)
- Solution M : mélange de 3 solution : 50ml de solution A + 0.5ml de solution B + 0.5 de solution C

Ajouter à 1ml d'échantillon 5ml de la solution M, agiter et laisser reposé 10 minutes à température ambiante. Puis ajouter 0.5ml de réactif de Folin dilué 1/3 après le développement de la réaction colorée, on laisse les échantillon à l'obscurité pendant 30 minutes, la lecture est faite à 650 nm.

Les protéines donnent en présence des réactifs de Lowry et Folin, une coloration bleue caractéristique. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de protéines présentes dans la solution.

La teneur en protéines est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$Y=1.4751 X$$

Y : Densité optique

X : Concentration en protéines (mg/g MF)

ANNEXE 3 : Paramètres biochimiques

Tab.1 : Variation de la teneur en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep en fonction de saison

<i>Organes</i>	Témoin	Hiver	Printemps	Eté	Automne
AP	0,458 ± 0,070	2,965 ± 0,528	2,458 ± 0,201	6,102 ± 0,278	1,466 ± 0,125
JP	0,328 ± 0,113	3,934 ± 0,608	2,923 ± 0,232	4,817 ± 0,047	1,303 ± 0,157
T	0,629 ± 0,060	2,844 ± 0,184	2,542 ± 0,347	6,518 ± 0,233	1,508 ± 0,040
R	0,254 ± 0,154	1,525 ± 0,128	1,681 ± 0,207	3,169 ± 0,336	0,946 ± 0,222

Tab. 2: Taux de variation de la teneur en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep par rapport au témoin

<i>Organes</i>	Témoin	Hiver	Printemps	Eté	Automne
AP	/	547,380	436,681	1232,314	220,087
JP	/	1099,390	791,159	1368,598	297,256
T	/	352,146	304,134	936,248	139,746
R	/	500,394	561,811	1147,638	272,441

Tab. 3: Variation de la teneur en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep en fonction de saison

<i>Organes</i>	Témoin	Hiver	Printemps	Eté	Automne
AP	177,669 ± 5,287	747,863 ± 7,756	549,524 ± 5,692	241,312 ± 5,248	425,249 ± 4,171
JP	205,663 ± 3,383	909,509 ± 3,613	745,840 ± 3,003	221,254 ± 3,823	365,230 ± 1,881
T	280,121 ± 7,532	688,111 ± 2,500	567,860 ± 2,585	345,246 ± 1,511	455,605 ± 3,583
R	230,557 ± 7,326	433,816 ± 11,390	335,564 ± 3,115	253,190 ± 1,505	335,564 ± 3,115

Tab. 4: Taux de variation de la teneur en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep par rapport au témoin.

<i>Organes</i>	Témoin	Hiver	Printemps	Eté	Automne
AP	/	336,127	209,297	35,821	139,349
JP	/	342,233	262,652	7,581	77,587
T	/	145,648	102,720	23,249	62,646
R	/	88,160	45,545	9,817	45,545

Tab. 5 : Variation de la teneur en chlorophylle « a » et « b », de la chlorophylle totale et du rapport (chlorophylle a/b) dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction de saison

	<i>Organes</i>	Témoin	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Chl "a"	AP	1,299 ± 0,092	0,516 ± 0,017	1,343 ± 0,016	0,530 ± 0,062	1,031 ± 0,100
	JP	1,050 ± 0,061	0,304 ± 0,018	1,142 ± 0,027	0,409 ± 0,098	1,031 ± 0,024
Chl "b"	AP	0,418 ± 0,023	0,208 ± 0,025	0,429 ± 0,114	0,176 ± 0,024	0,460 ± 0,032
	JP	0,306 ± 0,031	0,141 ± 0,007	0,282 ± 0,025	0,106 ± 0,034	0,347 ± 0,027
Chl "a+b"	AP	1,718 ± 0,088	0,723 ± 0,025	1,772 ± 0,125	0,706 ± 0,056	1,491 ± 0,126
	JP	1,356 ± 0,049	0,445 ± 0,022	1,424 ± 0,036	0,515 ± 0,065	1,378 ± 0,044
Chl "a/b"	AP	3,114 ± 0,320	2,510 ± 0,351	3,261 ± 0,735	3,057 ± 0,634	2,239 ± 0,153
	JP	3,463 ± 0,474	2,157 ± 0,141	4,066 ± 0,386	4,375 ± 2,328	2,982 ± 0,207

Annexes

Tab. 6: Taux de variation saisonnière de la teneur en chlorophylle « a » et « b », de la chlorophylle totale et du rapport (chlorophylle a/b) dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousse des semis de pin d'Alep par rapport au témoin

	<i>Organes</i>	Témoin	Hiver	printemps	Eté	Automne
Chlorophylle "a"	<i>AP</i>	/	-60,277	3,387	-59,199	-20,631
	<i>JP</i>	/	-71,048	8,762	-61,048	-1,810
Chlorophylle "b"	<i>AP</i>	/	-50,239	2,632	-57,895	10,048
	<i>JP</i>	/	-53,922	-7,843	-65,359	13,399
Chlorophylle "a+b"	<i>AP</i>	/	-57,916	3,143	-58,906	-13,213
	<i>JP</i>	/	-67,183	5,015	-62,021	1,622
Chlorophylle "a/b"	<i>AP</i>	/	-19,396	4,721	-1,830	-28,099
	<i>JP</i>	/	-37,713	17,413	26,336	-13,890

Tab.7: Variation de la teneur en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep en fonction du traitement thermique appliquée

<i>Organes</i>	Témoin	Basses températures				Hautes températures			
		2°C	- 2°C	- 6°C	- 10°C	38°C	40°C	42°C	44°C
<i>AP</i>	0,458	1,283	2,487	3,188	2,812	3,577	3,862	4,873	4,553
	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,070	0,156	0,054	0,166	0,186	0,124	0,259	0,170	0,109
<i>P</i>	0,328	0,980	2,133	2,989	2,621	2,063	3,417	4,545	3,683
	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,113	0,047	0,155	0,300	0,188	0,113	0,269	0,286	0,129
<i>T</i>	0,629	1,654	2,975	3,449	3,208	3,996	4,591	6,154	5,451
	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,060	0,164	0,062	0,430	0,172	0,339	0,122	0,035	0,135
<i>R</i>	0,254	0,795	2,105	2,518	2,252	1,439	2,282	3,572	3,211
	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,154	0,043	0,231	0,205	0,233	0,044	0,260	0,152	0,110

Tab.8 : Taux de variation de la teneur en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep en fonction du traitement thermique appliquée

<i>Organes</i>	Témoin	Basses températures				Hautes températures			
		2°C	- 2°C	- 6°C	- 10°C	38°C	40°C	42°C	44°C
<i>AP</i>	/	180,131	443,013	596,070	513,974	681,004	743,231	963,974	894,105
<i>JP</i>	/	198,780	550,305	811,280	699,085	528,963	941,768	1285,671	1022,866
<i>T</i>	/	162,957	372,973	448,331	410,016	535,294	629,889	878,378	766,614
<i>R</i>	/	212,992	728,740	891,339	786,614	466,535	798,425	1306,299	1164,173

Annexes

Tab.9: Variation de la teneur en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep en fonction du traitement thermique appliquée

Organes	Témoin	Basses températures				Hautes températures			
		2°C	- 2°C	- 6°C	- 10°C	38°C	40°C	42°C	44°C
<i>AP</i>	177,669	303,518	467,569	761,150	968,344	852,416	1201,797	1420,685	1524,522
	± 5,287	± 5,727	± 7,929	± 9,942	± 2,522	± 11,084	± 11,032	± 3,422	± 6,313
<i>JP</i>	205,663	461,243	561,913	550,212	760,760	949,404	1070,188	1241,200	1567,666
	± 3,383	± 4,980	± 12,240	± 14,920	± 5,296	± 5,943	± 10,492	± 1,595	± 6,462
<i>T</i>	280,121	337,119	334,195	649,391	622,002	980,681	1126,080	1528,743	1131,442
	± 7,532	± 14,484	± 2,227	± 18,878	± 6,532	± 3,294	± 7,614	± 4,137	± 3,043
<i>R</i>	230,557	219,229	301,655	419,309	516,422	480,071	598,571	685,055	707,209
	± 7,326	± 5,734	± 4,770	± 5,231	± 5,816	± 4,980	± 7,204	± 1,074	± 2,936

Tab.10: Taux de variation de la teneur en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep en fonction du traitement thermique appliquée

Organes	Témoin	Basses températures				Hautes températures			
		2°C	- 2°C	- 6°C	- 10°C	38°C	40°C	42°C	44°C
<i>AP</i>	/	70,833	163,169	328,409	445,027	379,778	576,425	699,625	758,069
<i>JP</i>	/	124,271	173,220	167,531	269,906	361,631	420,360	503,512	662,250
<i>T</i>	/	20,348	19,304	131,825	122,048	250,092	301,998	445,744	303,912
<i>R</i>	/	-4,913	30,837	81,868	123,989	108,222	159,620	197,130	206,739

Tab.11: Variation de la teneur en protéines dans les différents organes des semis de pin d'Alep en fonction du traitement thermique appliquée

Organes	Témoin	Basses températures				Hautes températures			
		2°C	- 2°C	- 6°C	- 10°C	38°C	40°C	42°C	44°C
<i>AP</i>	0,108	0,301	0,409	0,437	0,412	0,337	0,481	0,642	0,659
	± 0,029	± 0,022	± 0,034	± 0,024	± 0,012	± 0,012	± 0,029	± 0,011	± 0,007
<i>JP</i>	0,086	0,190	0,246	0,330	0,370	0,257	0,382	0,481	0,614
	± 0,019	± 0,017	± 0,022	± 0,020	± 0,036	± 0,011	± 0,020	± 0,012	± 0,013
<i>T</i>	0,066	0,112	0,106	0,151	0,183	0,214	0,328	0,431	0,559
	± 0,013	± 0,043	± 0,005	± 0,030	± 0,055	± 0,007	± 0,016	± 0,056	± 0,041
<i>R</i>	0,045	0,062	0,078	0,125	0,143	0,197	0,218	0,296	0,432
	± 0,020	± 0,008	± 0,014	± 0,007	± 0,014	± 0,013	± 0,007	± 0,042	± 0,029

Tab.12: Taux de variation de la teneur en protéines dans les différents organes des semis de pin d'Alep en fonction du traitement thermique appliquée

Organes	Témoïn	Basses températures				Hautes températures			
		2°C	- 2°C	- 6°C	- 10°C	38°C	40°C	42°C	44°C
AP	/	178,704	278,505	304,660	281,481	212,037	345,370	494,444	510,185
JP	/	120,930	185,620	283,721	330,233	198,837	344,186	459,302	613,953
T	/	69,697	60,236	128,370	177,273	224,242	396,970	553,030	746,970
R	/	37,778	73,333	178,701	217,778	337,778	384,444	557,778	860,000

Tab.13: Variation de la teneur en chlorophylle « a », « b », chlorophylle totale « a+b » et le rapport chlorophylle a/b dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction du traitement thermique appliquée

Organes	Témoïn	Basses températures				Hautes températures				
		2°C	-2°C	- 6°C	- 10°C	38°C	40°C	42°C	44°C	
Chl "a"	AP	1,299	0,867	0,756	0,480	0,588	0,670	0,578	0,322	0,312
		±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,092	0,023	0,086	0,023	0,050	0,197	0,072	0,028	0,051	
	0,061	0,030	0,027	0,017	0,044	0,195	0,018	0,021	0,031	
Chl "b"	AP	0,418	0,214	0,171	0,085	0,148	0,341	0,167	0,050	0,090
		±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,023	0,094	0,009	0,008	0,004	0,020	0,041	0,002	0,016	
	0,031	0,164	0,031	0,002	0,013	0,007	0,010	0,011	0,029	
Chl "a+b"	AP	1,718	1,082	0,927	0,565	0,736	1,010	0,745	0,371	0,402
		±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,088	0,073	0,086	0,015	0,046	0,197	0,113	0,030	0,065	
	0,049	0,143	0,040	0,017	0,055	0,201	0,012	0,010	0,013	
Chl "a/b"	AP	3,114	4,575	4,425	5,700	3,969	1,969	3,543	6,490	3,465
		±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,320	1,832	0,566	0,766	0,444	0,587	0,492	0,525	0,171	
	0,474	6,897	0,599	0,279	0,333	0,756	0,228	0,567	0,755	
JP	JP	1,050	0,737	0,679	0,356	0,409	0,691	0,676	0,292	0,207
		±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,061	0,030	0,027	0,017	0,044	0,195	0,018	0,021	0,031	
	0,031	0,164	0,031	0,002	0,013	0,007	0,010	0,011	0,029	
JP	JP	0,306	0,243	0,198	0,068	0,096	0,227	0,212	0,098	0,105
		±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,031	0,164	0,031	0,002	0,013	0,007	0,010	0,011	0,029	
	0,031	0,164	0,031	0,002	0,013	0,007	0,010	0,011	0,029	

Annexes

Tab.14: Taux de variation de la teneur en chlorophylle « a », « b », chlorophylle totale « a+b » et le rapport chlorophylle a/b dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction du traitement thermique appliquée

	Organes	Témoin	Basses températures				Hautes températures			
			2°C	-2°C	- 6°C	- 10°C	38°C	40°C	42°C	44°C
<i>Chl "a"</i>	<i>AP</i>	/	-33,256	-41,801	-63,048	-54,734	-48,422	-55,504	-75,212	-75,982
	<i>JP</i>	/	-29,810	-35,333	-66,095	-61,048	-34,190	-35,619	-72,190	-80,286
<i>Chl "b"</i>	<i>AP</i>	/	-48,804	-59,091	-79,665	-64,593	-18,421	-60,048	-88,038	-78,469
	<i>JP</i>	/	-20,588	-35,294	-77,778	-68,627	-25,817	-30,719	-67,974	-65,686
<i>Chl "a+b"</i>	<i>AP</i>	/	-37,020	-46,042	-67,113	-57,159	-41,211	-56,636	-78,405	-76,601
	<i>JP</i>	/	-27,729	-35,398	-68,732	-62,758	-32,301	-34,440	-71,239	-76,991
<i>Chl "a/b"</i>	<i>AP</i>	/	46,917	42,100	83,044	27,457	-36,769	13,776	108,414	11,272
	<i>JP</i>	/	76,928	0,837	50,881	23,592	-12,648	-7,652	-12,879	-38,839

ANNEXE 4 : Paramètres morphologiques

Tab.1: Paramètres morphologiques

<i>Saisons</i>	LPA (en cm)	LPR (en cm)	PFA (en g)	PSA (en g)	PFR (en g)	PSR (en g)	LPR/LPA	PSR/PSA
<i>Hiver (2008)</i>	11,681	8,573	1,466	0,671	0,549	0,350	0,737	0,532
	±	±	±	±	±	±	±	±
	1,016	0,556	0,309	0,151	0,449	0,285	0,060	0,473
<i>Printemps (2008)</i>	18,702	20,857	8,182	5,030	2,789	1,337	1,136	0,294
	±	±	±	±	±	±	±	±
	2,362	1,791	0,758	2,367	0,239	0,471	0,249	0,063
<i>Eté (2008)</i>	33,362	39,765	22,636	12,442	4,822	3,307	1,194	0,271
	±	±	±	±	±	±	±	±
	1,261	2,813	2,073	1,780	0,626	1,102	0,119	0,073
<i>Automne (2008)</i>	40,613	43,813	25,097	15,965	6,230	4,015	1,082	0,252
	±	±	±	±	±	±	±	±
	1,724	2,079	2,434	1,177	0,759	0,197	0,096	0,007
<i>Hiver (2009)</i>	44,679	46,953	25,850	16,829	6,427	4,229	1,053	0,252
	±	±	±	±	±	±	±	±
	2,146	1,495	2,254	0,933	0,871	0,045	0,073	0,011

Tab.2: Taux de croissance (en %) des différents paramètres morphologiques durant les quatre saisons

	LPA	LPR	PFA	PSA	PFR	PSR
<i>Printemps (2008)</i>	21,276	32,005	27,545	26,976	38,116	25,436
<i>Eté (2008)</i>	44,429	49,266	59,272	45,875	34,589	50,795
<i>Automne (2008)</i>	21,972	10,547	10,094	21,802	23,944	18,252
<i>Hiver (2009)</i>	12,324	8,181	3,089	5,347	3,352	5,517

Tab.3: Taux relatif de croissance des plants de pin d'Alep durant les quatre saisons

	PSA	PSR	PS Total	TRC
<i>Printemps (2008)</i>	5,030 ± 2,367	1,337 ± 0,471	6,367 ± 2,481	1,830 ± 0,112
<i>Eté (2008)</i>	12,442 ± 1,780	3,307 ± 1,102	15,750 ± 1,983	0,906 ± 0,266
<i>Automne (2008)</i>	15,965 ± 1,177	4,015 ± 0,197	19,980 ± 1,370	0,238 ± 0,068
<i>Hiver (2009)</i>	16,829 ± 0,933	4,229 ± 0,045	21,058 ± 0,975	0,053 ± 0,023

ANNEXE 5 : Résultats Statistiques

- AV1 -

Tab. 1 : Analyse de la variance de la teneur en proline durant les quatre saisons de l'année

Saisons	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Hiver	Organes	3	8,816	2,939	16,83	0,001	***
	Var. Résiduelle	8	1,397	0,175			
Printemps	Organes	3	2,4411	0,8137	12,62	0,002	**
	Var. Résiduelle	8	0,5160	0,0645			
Eté	Organes	3	20,4336	6,8112	110,14	0,000	***
	Var. Résiduelle	8	0,4947	0,0618			
Automne	Organes	3	0,5876	0,1959	8,61	0,007	**
	Var. Résiduelle	8	0,1821	0,0228			

Tab. 2 : Analyse de la variance de la teneur en sucres solubles durant les quatre saisons de l'année

Saisons	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Hiver	Organes	3	351219	117073	5,60	0,023	*
	Var. Résiduelle	8	167345	20918			
Printemps	Organes	3	253965	84655	14,65	0,001	***
	Var. Résiduelle	8	46240	5780			
Eté	Organes	3	27161	9054	1,94	0,202	NS
	Var. Résiduelle	8	37369	4671			
Automne	Organes	3	27019	9006	2,07	0,183	NS
	Var. Résiduelle	8	34785	4348			

Tab. 3 : Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle « a » durant les quatre saisons de l'année

Saisons	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Hiver	Organes	1	0,066993	0,066993	221,22	0,000	***
	Var. Résiduelle	4	0,001211	0,000303			
Printemps	Organes	1	0,061004	0,061004	127,40	0,000	***
	Var. Résiduelle	4	0,001915	0,000479			
Eté	Organes	1	0,02184	0,02184	3,26	0,145	NS
	Var. Résiduelle	4	0,02678	0,00670			
Automne	Organes	1	0,00000	0,00000	0,00	0,992	NS
	Var. Résiduelle	4	0,02118	0,00529			

Tab. 4 : Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle « b » durant les quatre saisons de l'année

Saisons	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Hiver	Organes	1	0,006600	0,006600	19,65	0,011	*
	Var. Résiduelle	4	0,001343	0,000336			
Printemps	Organes	1	0,03241	0,03241	4,75	0,095	NS
	Var. Résiduelle	4	0,02727	0,00682			
Eté	Organes	1	0,007420	0,007420	8,51	0,043	*
	Var. Résiduelle	4	0,003489	0,000872			
Automne	Organes	1	0,019380	0,019380	21,66	0,010	**
	Var. Résiduelle	4	0,003579	0,000895			

Tab. 5 : Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle total durant les quatre saisons de l'année

Saisons	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Hiver	Organes	1	0,115926	0,115926	214,74	0,000	***
	Var. Résiduelle	4	0,002159	0,000540			
Printemps	Organes	1	0,18200	0,18200	21,32	0,010	**
	Var. Résiduelle	4	0,03415	0,00854			
Eté	Organes	1	0,05491	0,05491	14,98	0,018	*
	Var. Résiduelle	4	0,01466	0,00366			
Automne	Organes	1	0,01904	0,01904	2,15	0,216	NS
	Var. Résiduelle	4	0,03543	0,00886			

Annexes

Tab. 6 : Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle a/b durant les quatre saisons de l'année

Saisons	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Hiver	Organes	1	0,1862	0,1862	2,61	0,182	NS
	Var. Résiduelle	4	0,2859	0,0715			
Printemps	Organes	1	0,972	0,972	2,82	0,168	NS
	Var. Résiduelle	4	1,377	0,344			
Eté	Organes	1	2,60	2,60	0,89	0,398	NS
	Var. Résiduelle	4	11,64	2,91			
Automne	Organes	1	0,8281	0,8281	24,96	0,008	**
	Var. Résiduelle	4	0,1327	0,0332			

Tab. 7: Test de Newman-keuls de la teneur en proline et sucres solubles dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction des saisons

Facteurs	Proline		Sucres solubles	
	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol}/\text{mg MS}$)	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol}/\text{mg MS}$)
Hiver	JP	3,934 A	JP	909,509 A
	AP	2,965 B	AP	747,863 AB
	T	2,844 B	T	688,111 AB
	R	1,525 C	R	433,816 B
Printemps	JP	2,923 A	JP	745,840 A
	T	2,542 A	T	567,860 B
	AP	2,458 A	AP	549,524 B
	R	1,681 B	R	335,564 C
Eté	T	6,518 A	NS	
	AP	6,102 A		
	JP	4,817 B		
	R	3,169 C		
Automne	T	1,508 A		
	AP	1,466 A		
	JP	1,303 A		
	R	0,946 B		

Tab. 8: Test de Newman-keuls de la teneur en chlorophylle dans les aiguilles des semis du pin d'Alep en fonction des saisons

Facteurs	Chl « a »		Chl « b »		Chl «a+b »		Chl «a+b »			
	Modalité	Moyenne estimée (en $\text{mg}/\text{g MF}$)	Modalité	Moyenne estimée (en $\text{mg}/\text{g MF}$)	Modalité	Moyenne estimée (en $\text{mg}/\text{g MF}$)	Modalité	Moyenne estimée (en $\text{mg}/\text{g MF}$)		
Hiver	AP	0,516 A	AP	0,208 A	AP	0,723 A	NS			
	JP	0,304 B	JP	0,141 B	JP	0,445 B				
Printemps	AP	1,343 A	NS		AP	1,772 A				
	JP	1,142 B			JP	1,424 B				
Eté	NS		AP	0,176 A	AP	0,706 A				
			JP	0,106 B	JP	0,515 B				
Automne			AP	0,460 A	NS				JP	2,982 A
			JP	0,347 B					AP	2,239 B

Tab. 9: Analyse de la variance à un critère de classification pour les paramètres morphologiques

Variables	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
LPA	Saisons	3	1683,57276	561,190919	17,5452534	0,000	***
	Var. Résiduelle	8	255,88273	31,9853413			
LPR	Saisons	3	3388,96871	1129,65624	64,9662967	0,000	***
	Var. Résiduelle	8	139,106742	17,3883427			
PFA	Saisons	3	5649,99406	1883,33135	156,7835	0,000	***
	Var. Résiduelle	8	96,0984469	12,0123059			
PSA	Saisons	3	2508,38161	836,127204	8,15758236	0,008	**
	Var. Résiduelle	8	819,975495	102,496937			
PFR	Saisons	3	2201,210	733,737	5,113	0,029	*
	Var. Résiduelle	8	1148,047	143,506			
PSR	Saisons	3	3272,07442	1090,69147	1,88388413	0,211	NS
	Var. Résiduelle	8	4631,67117	578,958896			
TRC	Saisons	3	5,805	1,935	11,869	0,003	**
	Var. Résiduelle	8	1,304	0,163			

Tab. 10: Test de Newman-keuls des paramètres morphologiques pour le facteur saison

Facteurs	Modalité	Moyenne estimée
LPA	Eté	44,429 A
	Automne	21,972 B
	Printemps	21,276 B
	Hiver	12,324 B
LPR	Eté	49,266 A
	Printemps	32,005 B
	Automne	10,547 C
	Hiver	8,181 C
PFA	Eté	59,272 A
	Printemps	27,545 B
	Automne	10,094 C
	Hiver	3,089 D
PSA	Eté	45,875 A
	Printemps	26,976 AB
	Automne	21,802 B
	Hiver	5,347 B
PFR	Printemps	38,116 A
	Eté	34,589 A
	Automne	23,944 AB
	Hiver	3,352 B
TRC	Printemps	1,823 A
	Eté	0,951 B
	Automne	0,242 B
	Hiver	0,053 B

Annexes

Tab. 11 : Analyse de la variance de la teneur en proline après les différents traitements thermiques

		Traitements thermiques	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
		Témoin (20±2°C)	Organes	3	0,2440	0,0813	7,24	0,011	*
			Var. Résiduelle	8	0,0899	0,0112			
Basses températures	2°C	Organes	3	1,2694	0,4231	30,70	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,1102	0,0138				
	-2°C	Organes	3	1,4849	0,4950	23,57	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,1680	0,0210				
	-6°C	Organes	3	1,3922	0,4641	5,39	0,025	*	
		Var. Résiduelle	8	0,6892	0,0861				
	-10°C	Organes	3	1,4260	0,4753	12,36	0,002	**	
		Var. Résiduelle	8	0,3076	0,0384				
Hautes températures	38°C	Organes	3	13,2754	4,4251	122,50	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,2890	0,0361				
	40°C	Organes	3	8,4185	2,8062	50,65	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,4432	0,0554				
	42°C	Organes	3	10,2324	3,4108	101,33	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,2693	0,0337				
	44°C	Organes	3	8,8057	2,9352	199,13	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,1179	0,0147				

Tab. 12 : Analyse de la variance de la teneur en sucres solubles après les différents traitements thermiques

		Traitements thermiques	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
		Témoin (20±2°C)	Organes	3	17023	5674	0,38	0,771	NS
			Var. Résiduelle	8	119837	14980			
Basses températures	2°C	Organes	3	90740	30247	1,01	0,438	NS	
		Var. Résiduelle	8	240202	30025				
	-2°C	Organes	3	131149	43716	1,82	0,222	NS	
		Var. Résiduelle	8	192325	24041				
	-6°C	Organes	3	190313	63438	0,90	0,483	NS	
		Var. Résiduelle	8	564156	70520				
	-10°C	Organes	3	343033	114344	10,31	0,004	**	
		Var. Résiduelle	8	88720	11090				
Hautes températures	38°C	Organes	3	477271	159090	8,21	0,008	**	
		Var. Résiduelle	8	155062	19383				
	40°C	Organes	3	668062	222687	6,52	0,015	*	
		Var. Résiduelle	8	273327	34166				
	42°C	Organes	3	990484	330161	101,52	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	26018	3252				
	44°C	Organes	3	1451268	483756	48,62	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	79592	9949				

Tab. 13 : Analyse de la variance de la teneur en protéines après les différents traitements thermiques

		Traitements thermiques	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
		Témoin (20±2°C)	Organes	3	0,006766	0,002255	5,14	0,029	*
			Var. Résiduelle	8	0,003510	0,000439			
Basses températures	2°C	Organes	3	0,097009	0,032336	48,50	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,005334	0,000667				
	-2°C	Organes	3	0,207147	0,069049	152,51	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,003622	0,000453				
	-6°C	Organes	3	0,198947	0,066316	134,26	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,003951	0,000494				
	-10°C	Organes	3	0,16054	0,05351	45,27	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,00946	0,00118				
Hautes températures	38°C	Organes	3	0,035237	0,011746	96,34	0,000	***	
		Var. Résiduelle	8	0,000975	0,000122				
	40°C	Organes	3	0,108290	0,036097	94,87	0,000	***	

Annexes

		Var. Résiduelle	8	0,003044	0,000380			
42°C		Organes	3	0,18356	0,06119	35,96	0,000	***
		Var. Résiduelle	8	0,01361	0,00170			
44°C		Organes	3	0,086799	0,028933	42,18	0,000	***
		Var. Résiduelle	8	0,005488	0,000686			

Tab. 14 : Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle « a » après les différents traitements thermiques

	Traitements thermiques	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification	
Basses températures	Témoin (20±2°C)	Organes	1	0,09325	0,09325	15,47	0,017	*	
		Var. Résiduelle	4	0,02410	0,00603				
	2°C	Organes	1	0,025480	0,025480	35,55	0,004	**	
		Var. Résiduelle	4	0,002867	0,000717				
	-2°C	Organes	1	0,00889	0,00889	2,19	0,213	NS	
		Var. Résiduelle	4	0,01624	0,00406				
	-6°C	Organes	1	0,022817	0,022817	54,87	0,002	**	
		Var. Résiduelle	4	0,001663	0,000416				
	-10°C	Organes	1	0,04788	0,04788	21,38	0,010	**	
		Var. Résiduelle	4	0,00896	0,00224				
	Hautes températures	38°C	Organes	1	0,0007	0,0007	0,02	0,902	NS
			Var. Résiduelle	4	0,1532	0,0383			
40°C		Organes	1	0,01441	0,01441	5,16	0,086	NS	
		Var. Résiduelle	4	0,01117	0,00279				
42°C		Organes	1	0,001291	0,001291	2,08	0,222	NS	
		Var. Résiduelle	4	0,002477	0,000619				
44°C		Organes	1	0,01633	0,01633	9,12	0,039	*	
		Var. Résiduelle	4	0,00717	0,00179				

Tab. 15 : Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle « b » après les différents traitements thermiques

	Traitements thermiques	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification	
Basses températures	Témoin (20±2°C)	Organes	1	0,018928	0,018928	24,90	0,008	**	
		Var. Résiduelle	4	0,003041	0,000760				
	2°C	Organes	1	0,0013	0,0013	0,07	0,803	NS	
		Var. Résiduelle	4	0,0714	0,0178				
	-2°C	Organes	1	0,001067	0,001067	2,03	0,227	NS	
		Var. Résiduelle	4	0,002101	0,000525				
	-6°C	Organes	1	0,0004167	0,0004167	12,38	0,024	*	
		Var. Résiduelle	4	0,0001347	0,0000337				
	-10°C	Organes	1	0,0042135	0,0042135	48,25	0,002	**	
		Var. Résiduelle	4	0,0003493	0,0000873				
	Hautes températures	38°C	Organes	1	0,019380	0,019380	86,26	0,001	***
			Var. Résiduelle	4	0,000899	0,000225			
40°C		Organes	1	0,003037	0,003037	3,45	0,137	NS	
		Var. Résiduelle	4	0,003520	0,000880				
42°C		Organes	1	0,0036015	0,0036015	61,22	0,001	***	
		Var. Résiduelle	4	0,0002353	0,0000588				
44°C		Organes	1	0,000323	0,000323	0,61	0,478	NS	
		Var. Résiduelle	4	0,002109	0,000527				

Tab. 16 : Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle total de différents traitements thermiques

	Traitements thermiques	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Basses températures	Témoin (20±2°C)	Organes	1	0,19657	0,19657	38,84	0,003	**
		Var. Résiduelle	4	0,02024	0,00506			
	2°C	Organes	1	0,0154	0,0154	1,19	0,337	NS
		Var. Résiduelle	4	0,0518	0,0129			
	-2°C	Organes	1	0,00390	0,00390	0,87	0,403	NS
		Var. Résiduelle	4	0,01790	0,00448			
	-6°C	Organes	1	0,029540	0,029540	108,74	0,000	***

Annexes

	-10°C	Var. Résiduelle	4	0,001087	0,000272				
		Organes	1	0,08027	0,08027	30,70	0,005	**	
Hautes températures	38°C	Var. Résiduelle	4	0,01046	0,00262				
		Organes	1	0,0130	0,0130	0,33	0,597	NS	
	40°C	Var. Résiduelle	4	0,1581	0,0395				
		Organes	1	0,03067	0,03067	4,75	0,095	NS	
	42°C	Var. Résiduelle	4	0,02583	0,00646				
		Organes	1	0,000523	0,000523	1,07	0,360	NS	
	44°C	Var. Résiduelle	4	0,001957	0,000489				
		Organes	1	0,01206	0,01206	5,42	0,080	NS	
			Var. Résiduelle	4	0,00891	0,00223			

Tab. 17 : Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle a/b de différents traitements thermiques

		Traitements thermiques	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
	Témoin (20±2°C)	Organes		1	0,182	0,182	1,11	0,351	NS
		Var. Résiduelle		4	0,655	0,164			
Basses températures	2°C	Organes		1	3,6	3,6	0,14	0,726	NS
		Var. Résiduelle		4	101,9	25,5			
	-2°C	Organes		1	1,304	1,304	3,84	0,122	NS
		Var. Résiduelle		4	1,357	0,339			
	-6°C	Organes		1	0,337	0,337	1,02	0,371	NS
		Var. Résiduelle		4	1,330	0,332			
	-10°C	Organes		1	0,145	0,145	0,95	0,386	NS
		Var. Résiduelle		4	0,615	0,154			
Hautes températures	38°C	Organes		1	1,673	1,673	3,65	0,128	NS
		Var. Résiduelle		4	1,831	0,458			
	40°C	Organes		1	0,179	0,179	1,22	0,332	NS
		Var. Résiduelle		4	0,588	0,147			
	42°C	Organes		1	18,089	18,089	60,58	0,001	***
		Var. Résiduelle		4	1,194	0,299			
	44°C	Organes		1	2,720	2,720	9,09	0,039	*
		Var. Résiduelle		4	1,197	0,299			

ANNEXE 6 : Résultats Statistiques
- AV2 -

Tab. 1 : Analyse de la variance des marqueurs biochimiques en fonction des saisons

	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Proline	Saisons	3	94,3843	31,4614	388,72	0,000	***
	Organes	3	19,0451	6,3484	78,44	0,000	***
Sucres solubles	Saisons	3	1250700	416900	46,69	0,000	***
	Organes	3	329282	109761	12,29	0,000	***
Chlorophylle « a »	Saisons	3	3,05806	1,01935	319,25	0,000	***
	Organes	1	0,10653	0,10653	33,36	0,000	***
Chlorophylle « b »	Saisons	3	0,30592	0,10197	45,72	0,000	***
	Organes	1	0,05920	0,05920	26,54	0,000	***
Chlorophylle «a+b »	Saisons	3	5,14900	1,71633	317,83	0,000	***
	Organes	1	0,32457	0,32457	60,10	0,000	***
Chlorophylle «a/b »	Saisons	3	9,137	3,046	3,63	0,036	*
	Organes	1	2,369	2,369	2,82	0,113	NS

Tab. 2 : Test de Newman-keuls de la teneur en proline et sucres solubles pour les facteurs saisons et organes

Facteurs	Proline		Sucres solubles	
	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol/mg MS}$)	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol/mg MS}$)
Saisons	Eté	5,151 A	Hiver	694,825 A
	Hiver	2,817 B	Printemps	549,697 B
	Printemps	2,401 C	Automne	395,412 C
	Automne	1,306 D	Eté	265,250 C
Organes	T	3,353 A	JP	560,458 A
	AP	3,248 A	T	514,206 A
	JP	3,244 A	AP	490,987 A
	R	1,830 B	R	339,533 B

Tab. 3 : Test de Newman-keuls de la teneur en chlorophylle pour les facteurs saisons et organes

Facteurs	Chl a		Chl b		Chl a+b	
	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)
Saisons	Printemps	1,243 A	Automne	0,404 A	Printemps	1,598 A
	Automne	1,031 B	Printemps	0,356 A	Automne	1,434 A
	Eté	0,470 C	Hiver	0,174 B	Eté	0,610 B
	Hiver	0,410 C	Eté	0,141 B	Hiver	0,584 B
Organes	AP	0,855 A	AP	0,318 A	AP	1,173 A
	JP	0,722 B	JP	0,219 B	JP	0,941 B

Annexes

Tab. 4 : Analyse de la variance des marqueurs biochimiques en fonction du traitement thermique à basse température

	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Proline	Stress	4	59,3688	14,8422	434,96	0,000	***
	Organes	3	5,2422	1,7474	51,21	0,000	***
Sucres solubles	Stress	4	1905823	476456	15,81	0,000	***
	Organes	3	348474	116158	3,86	0,016	*
Protéines	Stress	4	0,313514	0,078378	121,17	0,000	***
	Organes	3	0,563034	0,187678	290,13	0,000	***
Chlorophylle « a »	Stress	4	2,12280	0,53070	197,15	0,000	***
	Organes	1	0,17267	0,17267	64,15	0,000	***
Chlorophylle « b »	Stress	4	0,29089	0,07272	18,89	0,000	***
	Organes	1	0,00479	0,00479	1,24	0,278	NS
Chlorophylle «a+b »	Stress	4	3,97905	0,99476	196,07	0,000	***
	Organes	1	0,23550	0,23550	46,42	0,000	***
Chlorophylle «a/b »	Stress	4	21,19	5,30	1,00	0,430	NS
	Organes	1	0,19	0,19	0,04	0,850	NS

Tab. 5 : Analyse de la variance des marqueurs biochimiques en fonction du traitement thermique à haute température

	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Proline	Stress	4	139,1342	34,7835	1150,49	0,000	***
	Organes	3	33,6385	11,2128	370,87	0,000	***
Sucres solubles	Stress	4	7892494	1973123	120,71	0,000	***
	Organes	3	2453551	817850	50,03	0,000	***
Protéines	Stress	4	1,723442	0,430861	647,21	0,000	***
	Organes	3	0,339163	0,113054	169,82	0,000	***
Chlorophylle « a »	Stress	4	3,23239	0,80810	81,57	0,000	***
	Organes	1	0,02091	0,02091	2,11	0,162	NS
Chlorophylle « b »	Stress	4	0,359646	0,089911	183,43	0,000	***
	Organes	1	0,004130	0,004130	8,43	0,009	**
Chlorophylle «a+b »	Stress	4	5,6481	1,4120	131,34	0,000	***
	Organes	1	0,0440	0,0440	4,09	0,057	NS
Chlorophylle «a/b »	Stress	4	18,083	4,521	16,54	0,000	***
	Organes	1	4,242	4,242	15,52	0,001	***

Tab. 6 : Test de Newman-keuls de la teneur en proline pour les traitements à basse et haute température

Facteurs	Basses températures		Hautes températures	
	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol}/\text{mg MS}$)	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol}/\text{mg MS}$)
Température	-6°C	3,036 A	42°C	4,786 A
	-10°C	2,723 B	44°C	4,225 B
	-2°C	2,425 C	40°C	3,538 C
	+2°C	1,178 D	38°C	2,769 D
	20°C	0,418 E	20°C	0,418 E
Organe	T	2,383 A	T	4,164 A
	AP	2,046 B	AP	3,464 B
	JP	1,810 BC	JP	2,807 C
	R	1,585 C	R	2,151 D

Tab. 7: Test de Newman-keuls de la teneur en sucres solubles pour les traitements à basse et haute température

Facteurs	Basses températures		Hautes températures	
	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol/mg MS}$)	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol/mg MS}$)
Température	-10°C	716,882 A	44°C	1232,711 A
	-6°C	595,015 A	42°C	1170,374 A
	-2°C	416,333 B	40°C	999,157 B
	+2°C	330,277 BC	38°C	815,643 C
	20°C	223,503 C	20°C	223,504 D
Organe	AP	535,650 A	AP	1035,417 A
	JP	507,958 A	JP	1006,824 A
	T	444,565 AB	T	970,576 A
	R	337,435 B	R	540,294 B

Tab. 8: Test de Newman-keuls de la teneur en protéines pour les traitements à basse et haute température

Facteurs	Basses températures		Hautes températures	
	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g MF)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g MF)
Température	-10°C	0,277 A	44°C	0,566 A
	-6°C	0,261 A	42°C	0,463 B
	-2 °C	0,210 B	40°C	0,352 C
	+2 °C	0,166 C	38°C	0,251 D
	20°C	0,076 D	20°C	0,076 E
Organe	AP	0,333 A	AP	0,445 A
	JP	0,244 B	JP	0,364 B
	T	0,124 C	T	0,319 C
	R	0,091 C	R	0,237 D

Tab. 9: Test de Newman-keuls de la teneur en chlorophylle « a » pour les traitements à basse et haute température

Facteurs	Basses températures		Hautes températures	
	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)
Température	20°C	1,175 A	20°C	1,175 A
	+2 °C	0,802 B	38°C	0,680 B
	-2°C	0,717 B	40°C	0,627 B
	-10°C	0,498 C	42°C	0,307 C
	-6°C	0,418 C	44°C	0,259 C
Organe	AP	0,798 A	NS	
	JP	0,646 B		

Tab. 10: Test de Newman-keuls de la teneur en chlorophylle « b » pour les traitements à basse et haute température

Facteurs	Basses températures		Hautes températures	
	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)
Température	20°C	0,362 A	20°C	0,362 A
	+2 °C	0,229 AB	38°C	0,284 B
	-2°C	0,184 B	40°C	0,190 C
	- 10°C	0,122 B	44°C	0,097 D
	- 6°C	0,077 B	42°C	0,074 D
Organe	AP	NS	AP	0,213 A
	JP		JP	0,190 B

Annexes

Tab. 11: Test de Newman-keuls de la teneur en chlorophylle total pour les traitements à basse et haute température

Facteurs	Basses températures		Hautes températures	
	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)
Température	20°C	1,537 A	20°C	1,537 A
	+2 °C	1,031 B	38°C	0,964 B
	-2°C	0,902 B	40°C	0,817 B
	-10°C	0,621 C	42°C	0,381 C
	-6°C	0,495 C	44°C	0,357 C
Organe	AP	1,005 A	NS	
	JP	0,828 B		

Tab. 12: Test de Newman-keuls de la teneur en chlorophylle a/b pour les traitements à haute température

Facteurs	Basses températures		Hautes températures	
	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)
Température	NS		42°C	4,754 A
			40°C	3,370 B
			20°C	3,289 B
			44°C	2,792 B
			38°C	2,497 B
Organe	NS		AP	3,716 A
			JP	2,964 B

Tab. 13 : Analyse de la variance des marqueurs biochimiques en fonction du traitement thermiques à basse et haute température

	Source de variation	DDL	SC	C M	Test F	P	Signification
Proline	Stress	8	180,324	22,540	652,720	0.000	***
	Organes	3	34,360	11,453	331,659	0.000	***
Sucres solubles	Stress	8	12707753,753	1588469,219	65,758	0.000	***
	Organes	3	2570895,696	856965,232	35,476	0.000	***
Protéines	Stress	8	2,158	0,270	397,099	0.000	***
	Organes	3	0,914	0,305	448,559	0.000	***
Chlorophylle « a »	Stress	8	3,818	0,477	75,238	0.000	***
	Organes	1	0,100	0,100	15,750	0.000	***
Chlorophylle « b »	Stress	8	0,472	0,059	25,356	0.000	***
	Organes	1	0,003	0,003	1,249	0.271	NS
Chlorophylle «a+b »	Stress	8	6,781	0,848	102,927	0.000	***
	Organes	1	0,137	0,137	16,624	0.000	***
Chlorophylle «a/b »	Stress	8	54,928	6,866	2,234	0,048	*
	Organes	1	1,820	1,820	0,592	0,447	NS

Annexes

Tab. 14: Test de Newman-keuls de la teneur en marqueurs biochimiques pour les traitements thermiques

Facteurs	Proline		Sucres solubles		Protéines	
	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol/mg MS}$)	Modalité	Moyenne estimée (en $\mu\text{mol/mg MS}$)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g MF)
Températures	42°C	4,786A	44°C	1232,711 A	44°C	0,566 A
	44°C	4,225 B	42°C	1170,374 A	42°C	0,463 B
	40°C	3,538 C	40°C	999,157 B	40°C	0,352 C
	-6°C	3,036 D	38°C	815,643 C	- 10°C	0,277 D
	38°C	2,769 E	-10°C	716,882 CD	- 6°C	0,261 DE
	-10°C	2,723 E	-6°C	595,015 D	38°C	0,251 E
	-2°C	2,425 F	-2°C	416,333 E	- 2°C	0,210 F
	+2°C	1,178 G	+2°C	330,277 EF	+2°C	0,166 G
Organes	20°C	0,418 H	20°C	223,503 F	20°C	0,076 H
	T	3,568 A	AP	853,074 A	AP	0,421 A
	AP	3,010 B	NP	818,694 A	NP	0,329 B
	NP	2,529 C	T	755,065 A	T	0,239 C
	R	2,048 D	R	462,009 B	R	0,177 D

Tab. 15: Test de Newman-keuls de la teneur en chlorophylle pour les traitements thermiques

Facteurs	Chl a		Chl b		Chl a+b	
	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)	Modalité	Moyenne estimée (en mg/g M.F)
Températures	20°C	1,175 A	20°C	0,362 A	20°C	1,537 A
	+2°C	0,802 B	38°C	0,284 B	+2°C	1,031 B
	- 2°C	0,717 BC	+2°C	0,229 BC	38°C	0,964 BC
	38°C	0,680 C	40°C	0,190 C	- 2°C	0,902 CD
	40°C	0,627 C	- 2°C	0,184 C	40°C	0,817 D
	- 10°C	0,498 D	- 10°C	0,122 D	- 10°C	0,621 E
	- 6°C	0,418 D	44°C	0,097 D	- 6°C	0,495 F
	42°C	0,307 E	- 6°C	0,077 D	42°C	0,381 G
Organes	44°C	0,259 E	42°C	0,074 D	44°C	0,357 G
	AP	0,652 A	NS		AP	0,840 A
	NP	0,566 B			NP	0,739 B

ANNEXE 7 : Résistance stomatique

Tab. 1: Evolution journalière de la résistance stomatique

Jours	04/05/2008						15/06/2008							
	Heure	RSi	T	L	Cup°C	$\Delta T^\circ C$	RH %	Heure	RSi	T	L	Cup°C	$\Delta T^\circ C$	RH %
	8 h	158	23,75	112,5	23,9	-0,4	41,6	8 h	96	25,10	432,5	23,8	-1,7	42
	10 h	300	33,70	163,0	24,2	0,3	38,1	10 h	294	35,25	247,5	31,7	0,3	40,2
	12 h	310	33,85	477,5	29,3	0,1	38,9	12 h	395	33,35	297,5	28,3	-3,7	41,3
	14 h	268	29,75	120,0	25,5	-0,3	40,3	14 h	254	34,55	100,0	33,9	0,2	40,5
	16 h	202	23,95	48,0	23,3	0,1	40,8	16 h	94	31,80	27,5	35,2	0,4	41,6

- Variation de la résistance stomatique en fonction du traitement thermique -

Tab. 2: Témoin (20°C)

Mesures	Résistance stomatique	T	L	Cup°C	$\Delta T^\circ C$	RH %
Mesure1	96	22,100	250,000	22,650	-0,650	41,600
Mesure2	125	21,400	163,000	20,700	0,250	38,250
Mesure3	87	22,850	117,500	21,800	0,400	39,500
Moyenne	102,667	22,117	176,833	21,717	0,000	39,783
Ecart type	19,858	0,725	67,324	0,978	0,568	1,693

Tab. 3 : Traitement à 38°C

Avant Traitement à 38 C° (3h)							Après Traitement à 38 C° (3h)						
Mesures	RS	T	L	Cup°C	$\Delta T^\circ C$	RH %	RS	T	L	Cup°C	$\Delta T^\circ C$	RH %	
Mesure1	33,5	29,200	402,500	28,850	-1,800	38,700	65	30,150	827,500	29,150	-1,750	40,550	
Mesure2	42	28,050	407,500	27,900	-0,900	36,300	91	33,400	822,500	32,600	-2,200	41,250	
Mesure3	41	28,250	420,000	28,050	-0,750	38,000	87	32,350	822,500	31,650	-1,950	41,450	
Moyenne	38.833	28,500	410,000	28,267	-1,150	37,667	81	31,967	824,167	31,133	-1,967	41,083	
Ecart type	4,646	0,614	9,014	0,511	0,568	1,234	1,659	1,659	2,887	1,782	0,225	0,473	

Annexes

Tab. 4 : Traitement à 40°C

<i>Avant Traitement à 40 C° (3h)</i>							<i>Après Traitement à 40 C° (3h)</i>					
Mesures	RS	T	L	Cup°C	ΔT°C	RH %	RS	T	L	Cup°C	ΔT°C	RH %
Mesure1	232	31,100	810,000	31,100	-3,500	35,050	420	32,300	482,500	30,900	-3,400	39,700
Mesure2	251	32,300	772,500	32,200	-2,200	38,300	330	37,900	552,500	36,500	-1,700	40,400
Mesure3	210	32,400	740,000	31,650	-1,100	38,950	380	37,350	562,500	36,000	-1,900	40,450
Moyenne	231	31,933	774,167	31,650	-2,267	37,433	376,667	35,850	532,500	34,467	-2,333	40,183
Ecart type	20,518	0,723	35,030	0,550	1,201	2,089	45,092	3,087	43,589	3,099	0,929	0,419

Tab. 5: Traitement à 42°C

<i>Avant Traitement à 42 C° (3h)</i>							<i>Après Traitement à 42 C° (3h)</i>					
Mesures	RS	T	L	Cup°C	ΔT°C	RH %	RS	T	L	Cup°C	ΔT°C	RH %
Mesure1	85	33,000	750,000	30,700	-3,050	40,250	183	36,700	640,000	36,250	-2,350	41,750
Mesure2	190	35,850	525,000	32,650	-1,500	40,350	165	38,350	672,500	38,000	-1,600	40,950
Mesure3	120	36,800	597,500	32,950	-1,700	40,700	170	38,650	690,000	38,000	-0,800	40,350
Moyenne	131,667	35,217	624,167	32,100	-2,083	40,433	172,667	37,900	667,500	37,417	-1,583	41,017
Ecart type	53,463	1,978	114,846	1,222	0,843	0,236	9,292	1,050	25,372	1,010	0,775	0,702

Tab. 6: Traitement à 44°C

<i>Avant Traitement à 44 C° (3h)</i>							<i>Après Traitement à 44 C° (3h)</i>					
Mesures	RS	T	L	Cup°C	ΔT°C	RH %	RS	T	L	Cup°C	ΔT°C	RH %
Mesure1	320	30,200	810,000	28,950	-1,650	41,350	240	37,500	780,000	37,000	-1,450	37,150
Mesure2	290	31,400	765,000	31,200	-2,150	40,400	248	38,150	630,000	36,900	-0,200	36,250
Mesure3	315	31,850	760,000	30,750	-1,250	40,400	233	38,950	657,500	36,850	-0,350	38,650
Moyenne	308,33	31,150	778,333	30,300	-1,683	40,717	240,333	38,200	689,167	36,917	-0,667	37,350
Ecart type	16,073	0,853	27,538	1,191	0,451	0,548	7,506	0,726	79,857	0,076	0,683	1,212

Liste des figures

- Fig.1 : Aire de répartition du pin d'Alep (Quezel, 1980)
- Fig.2 : Aire de répartition du pin d'Alep en Algérie
- Fig.3: Aire de répartition de quelques conifères méditerranéens en fonction du coefficient pluviométrique d'Emberger et de la moyenne des minima du mois le plus froid
- Fig.4 : Principaux stress environnementaux aux quels les plantes sont confrontées
- Fig.5 : Facteurs conditionnant la réponse de la plante à un stress abiotique
- Fig.6: Taux exponentiel de réaction en fonction de la température
- Fig.7 : La membrane cellulaire (modèle de SINGER et NICOLSON)
- Fig.8 : Facteurs d'ouverture et de fermeture des stomates
- Fig.9: Localisation géographique de la région d'étude (Sétif)
- Fig.10 : Variation mensuelle de la pluviométrie de la région de Sétif (Période 1998-2007)
- Fig.11: Variation interannuelle de la pluviométrie (période 1998-2007)
- Fig.12: Répartition saisonnières des précipitations
- Fig.13: Evolution des températures durant l'année (Période 1998-2007)
- Fig.14: Amplitude thermique de la région de Sétif (période 1998-2007)
- Fig.15: Diagrammes Ombrothermiques de la région d'étude (1998-2007)
- Fig.16 : Climagramme d'Emberger pour la zone de Sétif
- Fig.17: Variation du Q2 durant la décennie 1998-2007
- Fig.18: Moyenne mensuelle de l'humidité de l'aire durant la période (1998-2007)
- Fig.19: Nombre des jours de gelées et des jours chauds de la période (2000-2007)
- Fig.20: Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction du traitement thermique à basse température
- Fig.21: Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à basse température
- Fig.22: Variation des teneurs en protéines dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction du traitement thermique à basse température
- Fig.23: Variation des teneurs en chlorophylle « a » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à basse température
- Fig.24: Variation des teneurs en chlorophylle « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des traitement thermiques à basse température
- Fig.25: Variation des teneurs en chlorophylle totale dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à basse température
- Fig.26: Variation des teneurs en chlorophylle a/b dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à basse température
- Fig.27: Corrélation entre les paramètres biochimiques des semis de pin d'Alep soumis à des températures fraîches
- Fig.28 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à haute température
- Fig.29: Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction du traitement thermique à haute température
- Fig.30: Variation des teneurs en protéines dans les différents organes des semis du pin d'Alep en fonction des traitements thermiques à haute température
- Fig.31: Variation des teneurs en chlorophylle « a » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des températures chaudes

- Fig.32 : Variation des teneurs en chlorophylle « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des températures chaudes
- Fig.33: Variation des teneurs en chlorophylle totale dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des températures chaudes
- Fig.34: Variation des teneurs en chlorophylle a/b dans les anciennes et les jeunes pousses des semis de pin d'Alep en fonction des températures chaudes
- Fig.35: Corrélation entre les paramètres biochimiques des semis de pin d'Alep soumis à des températures chaudes
- Fig.36: Variation du taux de la proline en fonction des traitements thermiques
- Fig.37: Variation du taux des sucres solubles en fonction des traitements thermiques
- Fig.38: Variation du taux de protéines en fonction des traitements thermiques
- Fig.39: Variation de la teneur en chlorophylle totale en fonction des traitements thermiques appliqués
- Fig.40: Corrélations entre l'intensité du stress appliqué et le cumul des marqueurs biochimiques testées
- Fig.41: Evolution des températures minimales de la saison hivernales pour la période 2001-2007
- Fig.42: Evolution des températures maximales de la saison estivales pour la période 2001-2007
- Fig.43: Stress de froid enregistrées durant la période 2005-2007 dans la région de Sétif
- Fig.44 : Cinétique des températures tri-horaires des périodes où les basses températures (inférieures à 2°C) ont durée plus de 24 heures
- Fig.45 : Stress de chaleur enregistrées durant la période 2005-2007 dans la région de Sétif
- Fig.46 : Cinétique des températures tri-horaires des périodes où les hautes températures supérieures à 34°C ont durée plus de 12 heures
- Fig.47 : Précipitations cumulées de la région de Sétif durant l'année expérimentale 2007-2008
- Fig.48: Températures moyennes mensuelles de l'année expérimentale (2007-2008) et pour la période (1998-2007) de la région de Sétif
- Fig.49 : Ecart à la normale des températures moyennes saisonnières de l'année expérimentale (2007-2008)
- Fig.50 : Températures mensuelles minimales et maximales de la région de Sétif durant l'année expérimentale (2007-2008)
- Fig.51 : Températures tri horaires de la région de Sétif durant l'année 2007-2008
- Fig.52 : Durée et fréquences des basses températures inférieures à $m = 2^{\circ}\text{C}$ de l'année 2008
- Fig.53 : Fréquence et durée des hautes températures supérieures à $M = 34^{\circ}\text{C}$ de l'année 2008
- Fig.54 : Stress de froid enregistrés durant la saison hivernale de l'année 2007-2008
- Fig.55 : Cinétique des températures fraîches de la saison hivernale de l'année 2008
- Fig.56 : Stress de froid enregistrées durant la saison printanière de l'année 2008
- Fig.57 : Cinétique des températures fraîches de la saison printanière de l'année 2008
- Fig.58 : Stress de chaleur enregistrées durant la saison estivale de l'année 2008
- Fig.59 : Cinétique des températures chaudes de la saison estivale de l'année 2008
- Fig.60 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison hivernale de l'année 2007-2008
- Fig.61 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison printanière de l'année 2008
- Fig.62 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison estivale de l'année 2008
- Fig.63 : Variation des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison automnale de l'année 2008
- Fig.64 : Variation inter-saisonnière des teneurs en proline dans les différents organes des semis de pin d'Alep

- Fig.65 : Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison hivernale de l'année 2007-2008
- Fig.66 : Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison printanière de l'année 2008
- Fig.67 : Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison estivale de l'année 2008
- Fig.68 : Variation des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep durant la saison automnale de l'année 2008
- Fig.69 : Variation inter-saisonnière des teneurs en sucres solubles dans les différents organes des semis de pin d'Alep
- Fig.70: Teneurs en chlorophylle « a » et chlorophylle « b » dans les aiguilles des anciennes et les jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison hivernale
- Fig.71 : Variation de la teneur en chlorophylle totale et du rapport (chlorophylle a/b) dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison hivernale
- Fig.72 : Teneurs en chlorophylle « a » et « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison printanière
- Fig.73 : Variation de la teneur en chlorophylle totale et du rapport (a/b) dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison printanière
- Fig.74 : Teneurs en chlorophylle « a » et « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison estivale
- Fig.75 : Variation de la teneur en chlorophylle totale et du rapport (a/b) dans les anciennes et les jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison estivale
- Fig.76 : Teneurs en chlorophylle « a » et « b » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison automnale
- Fig.77 : Variation de la teneur en chlorophylle totale et du rapport (chlorophylle a/b) dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep durant la saison automnale
- Fig.78 : Variation inter-saisonnière des teneurs en chlorophylle « a » dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep
- Fig.79 : Variation inter-saisonnière des teneurs en chlorophylle « b » dans les aiguilles des anciennes et jeunes pousses des semis de pin d'Alep
- Fig.80: Variation inter-saisonnière des teneurs en chlorophylle totale dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep
- Fig.81 : Variation inter-saisonnière des teneurs en chlorophylle a/b dans les aiguilles des anciennes et des jeunes pousses des semis de pin d'Alep
- Fig.82 : Cumul saisonnier de la teneur en proline au niveau de la plante entière des semis de pin d'Alep en conditions naturelles
- Fig.83 : Cumul saisonnier de la teneur en sucres solubles au niveau de la plante entière des semis de pin d'Alep en conditions naturelles³
- Fig.84 : Cumul saisonnier de la teneur en chlorophylle totale au niveau des aiguilles des semis de pin d'Alep en conditions naturelles
- Fig.85 : Résistance stomatique des aiguilles des semis de pin d'Alep avant et après l'application des stress thermiques
- Fig.86 : Evolution journalière de la résistance stomatique (le 04-05-2008)
- Fig.87 : Evolution journalière de la résistance stomatique (le 15-06-2008)
- Fig.88 : Relation entre la résistance stomatique et la température et la lumière
- Fig.89 : Evolution saisonnière de la longueur de la tige
- Fig.90 : Taux de croissance de la tige en fonction des saisons
- Fig.91 : Vitesse d'allongement de la tige en fonction des saisons

- Fig.92 : Evolution saisonnière de la longueur racinaire
- Fig.93 : Taux de croissance racinaire en fonction des saisons
- Fig.94 : Vitesse d'allongement racinaire en fonction des saisons
- Fig.95 : Variation saisonnière du rapport (LPR / LPA) des semis de pin d'Alep en conditions naturelles
- Fig.96 : Evolution du poids sec de la partie aérienne en fonction des saisons
- Fig.97 : Taux d'évolution de la biomasse sèche de la partie aérienne en fonction des saisons
- Fig.98 : Evolution du poids sec de la partie racinaire en fonction des saisons
- Fig.99 : Taux d'évolution de la biomasse sèche du système racinaire en fonction des saisons
- Fig.100 : Variation saisonnière du taux relatif de croissance total (TRC)
- Fig.101 : Variation saisonnière du rapport (PSR / PSA)

Liste des photos

- Photo 1 : Semis de pin d'Alep dans une chambre de culture à conditions semi contrôlées
- Photo 2 : Semis de pin d'Alep après 9 mois de culture en milieu naturel (dans la région de Sétif)
- Photos 3 : Développement de la partie racinaire des semis de pin d'Alep après la saison hivernale et estivale
- Photos 4 : Développement des semis de pin d'Alep après la saison hivernale et estivale

Liste des tableaux

- Tab.1: Superficies du pin d'Alep en Algérie (en ha)
- Tab.2 : Précipitations mensuelles moyennes enregistrées à la station de Sétif pendant la période (1998-2007)
- Tab.3 : Régime saisonnier de la région de Sétif (1998-2007)
- Tab.4 : Températures mensuelles minimales (m), maximales (M), moyennes (M+m/2) et amplitudes thermiques (M-m) de la station de Sétif (Période 1998-2007)
- Tab.5 : Quotient pluviométrique d'Emberger de la région de Sétif (1998-2007)
- Tab.6 : Evaluation du Q2 en fonction de l'altitude
- Tab.7 : Variation annuelle du Q2 sur une période de 10 ans (1998-2007) dans la région de Sétif
- Tab.8 : Indice de Xérite (ISE)
- Tab.9 : Valeurs de l'indice d'aridité (Guyot, 1999)
- Tab.10 : L'indice d'aridité de De Martonne de la région de Sétif
- Tab.11 : Moyenne mensuelle de l'humidité de l'aire durant la période (1998-2007)
- Tab.12 : Vitesse mensuelle du vent (Station de Sétif 1998-2007)
- Tab.13 : Matrice de corrélation des principaux paramètres physiologiques mesurées après l'application des traitements thermiques à basses températures
- Tab.14 : Matrice de corrélation des principaux paramètres physiologiques mesurés après l'application des traitements thermiques à haute température
- Tab.15 : Caractéristiques des traitements thermiques appliqués
- Tab.16 : Résultats de l'étude statistique descriptive des températures minimales de la région de Sétif (période 2005-2007)
- Tab.17 : Résultats de l'étude statistique descriptive des températures maximales de la région de Sétif (période 2005-2007)
- Tab.18 : Comparaison des valeurs saisonnières de précipitations (mm) et du nombre de jours pluvieux de l'année 2007-2008
- Tab.19: Températures moyennes de l'année expérimentale (2007-2008) et de la période 1998-2007 de la station de Sétif
- Tab.20 : Fréquences et durées des températures fraîches inférieures à 2°C de l'année 2007-2008
- Tab.21 : Fréquences et des durées des hautes températures supérieures à M= 34°C de l'année 2008
- Tab.22 : Matrice de corrélation entre les variables biochimiques
- Tab.23: Importance des marqueurs biochimiques étudiés durant les saisons de l'année
- Tab.24 : Matrice de corrélation entre les variables morphologiques
- Tab.25: Taux de mortalité des semis de pin d'Alep en fonction des saisons

تأقلم شجيرات الصنوبر الحلبي للظروف الإجهادية الحرارية

المخلص:

في الجزائر، تتمركز غابات الصنوبر الحلبي في المناطق الجافة والشبه الجافة حيث الظروف المناخية تحد من الإنتاج النباتي. بسبب عدم توقع الإجهاد الحراري، تحمل النباتات يصبح الإستراتيجية الفعالة لمثل هذه الظروف الإجهادية القاسية من جهة والطويلة المدة من جهة أخرى. يترافق مع هذا التحمل تغيرات بنوية أو وظيفية والتي تزيد من احتمال نجاح الإنتاج النباتي في مثل هذه الظروف.

خلال هذه الدراسة، تخضع شجيرات الصنوبر الحلبي لتجربتين، الأولى تتلخص في وضع هذه الشجيرات لظروف نصف مراقبة والثانية تعريض هذه الشجيرات للظروف الطبيعية. نهدف من خلال دراستنا هذه تقدير تأثير الإجهاد الحراري من خلال مؤشرات بيوكيميائية كاصطناع البرولين، السكريات القابلة للتحلل، الكلوروفيل، البروتينات و كذلك فحص مستوى هذه المؤشرات بين أعضاء النباتات (الأوراق الإبرية للنتش القديم والجديد، الساق و الجذور).

في الظروف الطبيعية، تراكم مختلف المركبات القابلة للذوبان تبين أن السكريات القابلة للتحلل و البرولين تتمركزان أساسا في النتش (الأوراق)، السيقان والجذور، لكن فصل الشتاء (مرحلة التصلب) و الربيع (مرحلة النمو النشط) هي التي تسجل أكبر نسبة لهاته المؤشرات في حين محتوى الكلوروفيل يتناقص بشدة. حدة الإجهاد مرتبطة إيجابيا مع البرولين والسكريات القابلة للتحلل، وسلبيا مع الكلوروفيل في فصلي الشتاء والصيف.

فيما يخص قدرة الثغور لتنظيم التبادلات الهوائية على مستوى الأوراق، ارتفاع الحرارة أدى إلى زيادة شدة المقاومة الثغرية والذي يدل على غلق الشريط الثغري للأوراق الإبرية لشجيرات الصنوبر الحلبي كوسيلة للتكيف مع هذا الإجهاد.

بالإضافة إلى أن القياسات الفزيولوجية المحصل عليها بعد تعريض الشجيرات للإجهادات الحرارية تؤكد تحمل هذه الأخيرة للحرارة المنخفضة و المرتفعة. هذه الظروف الإجهادية أدت إلى انخفاض في محتوى النباتات للكلوروفيل، تراكم للبرولين و السكريات القابلة للتحلل مع ارتفاع في نسبة تصنيع البروتينات. الكلوروفيل يرتبط ارتباطا سلبيا مع الأيضات الأخرى والتي ترتبط فيما بينها. النتائج بينت أن تركيز هذه المركبات يتغير تبعا لعضو النبات و كذلك تبعا لشدة الإجهاد مع مجال حراري لهذه الشجيرات محصور بين 10°C و 42°C .

على الصعيد المورفولوجي، نمو شجيرات الصنوبر الحلبي تناقص بشدة أثناء الظروف الشتوية لكن معدل النمو يتحسن في فصل الربيع ويصل إلى مستواه الأقصى في فصل الصيف.

خلاصة الدراسة تبين خاصية التأقلم الحراري لشجيرات الصنوبر الحلبي والتي تستعمل نفس الإستراتيجيات لتحمل الإجهاد الحراري ولكن الاختلاف الوحيد يتعلق بمعدل تصنيع المؤشرات البيوكيميائية المدروسة.

الكلمات المفتاحية: شجرة الصنوبر الحلبي، الإجهاد الحراري، التحمل، البرولين، السكريات القابلة للتحلل، الكلوروفيل، البروتينات، المقاومة الثغرية.

The seedling Behavior of Aleppo pine under thermal stresses

SUMMARY:

In Algeria, the pine forests are concentrated mainly in arid and semi arid regions where the climatic conditions limit the production potential seriously. Due to the unpredictable nature of thermal stress, tolerance is the most effective strategy in situations of severe and prolonged stress. At the time of this tolerance one attends modifications of structures or functions which increase the probability of being useful and production plants in these conditions.

In this study, seedlings of Aleppo pine are conducted according to two tests, first under semi-controlled conditions and under natural conditions. We fixed as objective to evaluate the effect of thermal stress from the biochemical markers such as the synthesis of proline, sugars, chlorophyll, proteins and to examine differences in these parameters between the organ (old needles and young shoots, stems and roots).

The accumulation of various osmolytes under natural conditions showed that the sugars and proline, are much more concentrated in shoots (needles), stems and roots, but the winter period (hardness) and spring (active growth period) that give the greatest rate, the values of chlorophyll observed significant falls. The intensity of stress is positively correlated with proline, soluble sugars, and negatively with chlorophylls in winter and summer.

At leaf level, high temperatures are manifested by a change in gas exchange following the closure of stomatal bands which may reflect an adaptation of the needles of Aleppo pine to heat stress.

Thus, the biochemical parameters measured after the application of heat treatments also reflect a tolerance to low and high temperatures. These conditions have resulted in seedlings of Aleppo pine a reduction of chlorophyll content, an accumulation of osmoticums including proline and sugars as well as an increase in protein synthesis. Chlorophyll is negatively correlated with the other metabolites, which are correlated with each other. The results show that the concentrations of these compounds vary depending on the seedling organ and the severity of stress with thermal limits between -10 °C and 42 °C.

On the morphological plan, growth of seedlings of Aleppo pine is greatly weakened by the winter conditions. However, the rate of recovery is improved during the spring season and reaches a maximum value during the summer season.

In conclusion, the study revealed the thermophilous character of seedlings of Aleppo pine and shows that these last used the same strategies of tolerance opposite to the thermal stress but the only difference is in the synthesis rates of the studied markers.

Key words: Aleppo pine, thermal stress, tolerance, proline, sugars, chlorophyll, proteins, stomatic resistance.

Comportement des semis de Pin d'Alep sous contraintes thermiques

Résumé :

En Algérie, les pinèdes se concentrent principalement dans les zones arides et semi arides là où les conditions climatiques limitent sérieusement le potentiel de production. En raison du caractère imprévisible de la contrainte thermique, la tolérance s'avère la stratégie la plus efficace dans les situations de stress sévère et prolongé. Lors de cette tolérance, on assiste à des modifications de structures ou de fonctions qui augmentent la probabilité de production des plantes lors de ces conditions.

Dans ce travail, les semis de pin d'Alep sont conduits selon deux essais, d'une part sous conditions semis-contrôlées, d'autre part sous conditions naturelles. Nous avons fixé comme objectif d'évaluer l'effet du stress thermique à partir des marqueurs biochimiques tels que, la synthèse de la proline, des sucres solubles, de la chlorophylle, des protéines et d'examiner les différences de ces paramètres entre les organes (aiguilles des anciennes et des jeunes pousses, tiges et racines).

L'accumulation des différents osmolytes en conditions naturelles montre que les sucres solubles et la proline sont beaucoup plus concentrés au niveau des pousses (aiguilles), tiges et racines, mais c'est la période hivernale (endurcissement) et le printemps (période de croissance active) qui donnent les plus grands taux, les valeurs de la chlorophylle observent des chutes importantes. L'intensité du stress est corrélé positivement avec la proline et les sucres solubles, et négativement avec les chlorophylles en hiver et en été.

Au niveau foliaire, les hautes températures se manifestent par une modification des échanges gazeux à la suite de la fermeture des bandes stomatiques ce qui peut traduire une adaptation des aiguilles des semis de pin d'Alep à la contrainte thermique.

Ainsi, les paramètres biochimiques mesurés après l'application des traitements thermiques traduisent également une tolérance aux basses et hautes températures. Ces conditions ont entraîné chez les semis de pin d'Alep une réduction de la teneur en chlorophylle, une accumulation d'osmolytes dont la proline et les sucres solubles ainsi qu'une augmentation de la synthèse protéique. La chlorophylle est corrélée négativement avec les autres métabolites, qui eux sont corrélés entre eux. Les résultats montrent que les concentrations de ces différents composés varient selon l'organe de la plante et la sévérité du stress avec un éventail thermique comprise entre -10°C et 42°C.

Sur le plan morphologique, la croissance des semis de pin d'Alep est fortement affaiblie par les conditions de l'hiver. Cependant le taux de reprise est amélioré durant la saison printanière et atteint une valeur maximale durant la saison estivale.

En conclusion, l'étude révèle le caractère thermophile des semis de pin d'Alep et montre que ces derniers ont utilisé les mêmes stratégies de tolérance vis à vis du stress thermique mais la seule différence concerne le taux de synthèse des marqueurs étudiés.

Mots clés : Pin d'Alep, stress thermique, tolérance, proline, sucres solubles, chlorophylle, protéines, résistance stomatique.

Nom : LAALA
Prénom : AHMED

Date de soutenance : 16/11/2009

THEME

Comportement des semis de Pin d'Alep sous contraintes thermiques

RESUME

En Algérie, les pinèdes se concentrent principalement dans les zones arides et semi arides là où les conditions climatiques limitent sérieusement le potentiel de production. En raison du caractère imprévisible de la contrainte thermique, la tolérance s'avère la stratégie la plus efficace dans les situations de stress sévère et prolongé. Lors de cette tolérance, on assiste à des modifications de structures ou de fonctions qui augmentent la probabilité de production des plantes lors de ces conditions.

Dans ce travail, les semis de pin d'Alep sont conduits selon deux essais, d'une part sous conditions semis-contrôlées, d'autre part sous conditions naturelles. Nous avons fixé comme objectif d'évaluer l'effet du stress thermique à partir des marqueurs biochimiques tels que, la synthèse de la proline, des sucres solubles, de la chlorophylle, des protéines et d'examiner les différences de ces paramètres entre les organes (aiguilles des anciennes et des jeunes pousses, tiges et racines).

L'accumulation des différents osmolytes en conditions naturelles montre que les sucres solubles et la proline sont beaucoup plus concentrés au niveau des pousses (aiguilles), tiges et racines, mais c'est la période hivernale (endurcissement) et le printemps (période de croissance active) qui donnent les plus grands taux, les valeurs de la chlorophylle observent des chutes importantes. L'intensité du stress est corrélé positivement avec la proline et les sucres solubles, et négativement avec les chlorophylles en hiver et en été.

Au niveau foliaire, les hautes températures se manifestent par une modification des échanges gazeux à la suite de la fermeture des bandes stomatiques ce qui peut traduire une adaptation des aiguilles des semis de pin d'Alep à la contrainte thermique.

Ainsi, les paramètres biochimiques mesurés après l'application des traitements thermiques traduisent également une tolérance aux basses et hautes températures. Ces conditions ont entraîné chez les semis de pin d'Alep une réduction de la teneur en chlorophylle, une accumulation d'osmolytes dont la proline et les sucres solubles ainsi qu'une augmentation de la synthèse protéique. La chlorophylle est corrélée négativement avec les autres métabolites, qui eux sont corrélés entre eux. Les résultats montrent que les concentrations de ces différents composés varient selon l'organe de la plante et la sévérité du stress avec un éventail thermique comprise entre -10°C et 42°C.

Sur le plan morphologique, la croissance des semis de pin d'Alep est fortement affaiblie par les conditions de l'hiver. Cependant le taux de reprise est amélioré durant la saison printanière et atteint une valeur maximale durant la saison estivale.

En conclusion, l'étude révèle le caractère thermophile des semis de pin d'Alep et montre que ces derniers ont utilisé les mêmes stratégies de tolérance vis à vis du stress thermique mais la seule différence concerne le taux de synthèse des marqueurs étudiés.

Mots clés : Pin d'Alep, stress thermique, tolérance, proline, sucres solubles, chlorophylle, protéines, résistance stomatique.

Laboratoire de recherche : Développement et valorisation des ressources phytogénétiques.

Mr ALATOU D

**Directeur de recherche :
Prof. Université de Constantine**