

EFFET DE LA SOLARISATION DU SOL SUR LA CROISSANCE DE PLANTS DE PIN MARITIME EN PÉPINIÈRE FORESTIÈRE

G. AZOUAOU –IDJER¹ et A. KEDAD²

1 : Laboratoire de pathologie et Mycologie forestières, Division Santé des Forêts, Unité Foresterie, INRF.
E.mail : elsabr2000@yahoo.fr.

2 : Laboratoire de Mycologie, Département de Botanique, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie.

ملخص

يعتبر التشميس عملية تقشير الأرض بغلاف بلاستيكي شفاف لتعقيم تربتها. ولقد أجريت تجربة هذه الطريقة على تربية شتائل الصنوبر البحري بمشئلة غابية ببينام لمدة شهرين كاملين، حيث وصلت درجة حرارة الأرض إلى أقصاها تحت الغلاف. خلف التطبيق المحلي لهذه التقنية آثارا إيجابية واضحة على شتلات الصنوبر البحري، حيث طرأ تحسنا في نوعية الشتلات، ولقد سجلنا زيادة في نموها من حيث الارتفاع والوزن وزيادة على ذلك اكتسبت الشتلات خصائص التأقلم في المناطق الجافة.

كلمات مفتاحية : تعقيم التربة، النمو، الصنوبر البحري، التشميس.

RÉSUMÉ

La solarisation de sol, technique de désinfection du sol, utilise l'énergie solaire pour réchauffer un sol humidifié. Le film de polyéthylène transparent employé permet au rayonnement solaire d'être transmis directement au sol et réduit également la perte d'humidité du sol par l'évaporation.

La technique expérimentée durant les deux mois les plus chauds de l'année dans une pépinière du littoral algérien (Baïnem) révèle des effets bénéfiques sur l'aspect qualitatif de la production de pin maritime. Il a été constaté une amélioration de la qualité des plants de pin maritime produits. En effet, la solarisation du sol a provoqué une stimulation de la croissance en hauteur et en biomasse de plants de *Pinus pinaster* Ait. Par ailleurs, les plants développent des caractéristiques propres aux plantes adaptées au stress hydrique.

Mots clés : Désinfection du sol, croissance, *Pinus pinaster* Ait, solarisation du sol.

INTRODUCTION

Les champignons telluriques causent, le plus souvent, des dégâts non négligeables au niveau de la plupart des spéculations agricoles ou sylvicoles. C'est ainsi que dans les milieux forestiers, certains de ces agents peuvent engendrer des pertes appréciables sur les plantes adultes comme par exemple *Phytophthora cinnamomi* Rands qui cause le "Jarrak die back" de l'*Eucalyptus* et la maladie de l'«encre du châtaignier» et *Armillaria mellea* (Vahl.) Kummer qui constitue un parasite redou-

table des racines des résineux chez qui il provoque des altérations connues sous le nom de pourridiés (Lanier, 1978). Par ailleurs, d'autres champignons comme *Fusarium oxysporum* Schlecht., et *Rhizoctonia solani* Kühn et certaines espèces de *Pythium* Pringsheim causent sur les jeunes semis naturels ou artificiels des fontes de semis ou «Damping-off». Ces dernières maladies se développent chez un grand nombre d'essences forestières particulièrement chez les résineux et plus spécialement chez les pins dont l'importance pratique est très grande en Algérie.

Plusieurs méthodes de lutte sont préconisées contre les agents des fontes de semis. Mais, la désinfection du sol constitue certainement un moyen de protection efficace contre les champignons telluriques. Cependant, elle présente certains inconvénients comme l'induction des désordres chimiques, physiques et biologiques du sol qui entraînent la plupart du temps des perturbations dans les équilibres de la microflore tellurique. En effet, cette méthode de lutte n'est pas spécifique car elle ne discrimine pas entre les micro-organismes phytopathogènes et les agents qui sont bénéfiques pour la plante (champignons antagonistes ou mycorrhizogènes). Il serait donc, fort intéressant de rechercher d'autres alternatives de lutte efficace, simple, économique et sans risque.

L'emploi de l'énergie solaire mérite d'être étudié et développé en pépinière forestière. Ce procédé consiste en une désinfection du sol par l'énergie solaire en utilisant un film en polyéthylène transparent qui recouvre le sol durant l'été. Ce type de désinfection est peu coûteux car il ne nécessite pas l'emploi de produits chimiques et il est sans risque écologique car il ne provoque pas de "choc" au niveau de la microflore tellurique.

La solarisation se base sur le fait que les parasites telluriques sont moins thermotolérants que les micro-organismes saprophytes ou antagonistes. Elle n'entraîne pas de grandes élévations de températures, néanmoins elle crée des conditions létales ou sub-létales pour la plupart des pathogènes telluriques.

L'efficacité de la solarisation a été testée dans plusieurs pays où les températures estivales sont relativement élevées, sur plusieurs plantes cultivées, sous diverses conditions écologiques et contre plusieurs agents phytopathogènes du sol (champignons, bactéries, nématodes, ...etc.). (Pullman *et al.*, (1979, 1981, 1984) ; Katan *et al.*, (1981, 1983) ; Stapleton *et al.*, (1982, 1983, 1984, 1986, 1988) ; Ashworth et Gaona (1982) et Fukui (1982) et Horiuchi (1984) Ashworth et Gaona (1982) ; Tjamos et Paplomatas (1988), Stapleton et Garcia-Lopez (1988).

Par ailleurs, divers travaux ont montré que le contrôle des différents parasites telluriques, des mauvaises herbes par la désinfection du sol conduit généralement à l'amélioration de la croissance et à l'accroissement du rendement des cultures. Cet effet bénéfique inattendu sur la croissance des plants est actuellement reconnu comme l'un des effets importants de la désinfection du sol. Increased Growth Response ou IGR est le terme communément utilisé pour décrire ce phénomène (Katan, 1984 ; 1987).

Dans ce sens, un essai de solarisation par l'emploi de film plastique en polyéthylène transparent a été mené avec pour objectif principal l'estimation des diverses potentialités de cette technique dans une pépinière forestière sur le pin maritime [*Pinus pinaster* Aiton subsp. *renoui* (Huguet del Vilar) Maire)], espèce très sensible à la maladie des fontes de semis (Houari, 1983). Dans cet article l'accent sera mis

sur les effets de la solarisation du sol sur la croissance de plants de pin maritime suite à son application pour le traitement de la maladie des fontes de semis.

MATERIEL ET METHODES

Le matériel végétal que nous avons utilisé pour notre étude est le pin maritime (*Pinus pinaster* Aiton). Le choix de cette essence forestière est justifié par son utilisation dans les reboisements d'une part et d'autre part par sa sensibilité aux fontes des semis.

2.1. Protocole expérimental

Le protocole expérimental est installé au niveau de la pépinière expérimentale de l'INRF (Institut National de la Recherche Forestière) à Baïnem.

Il se présente sous forme quatre blocs aléatoires complets (Fig. : 1). Chaque bloc comporte trois traitements : un témoin (T), un essai solarisé (S) et un autre traité à l'aide de deux fongicides (TC) : le bénomyl (2-3 gr/m² à raison de 60 gr ma/hl d'eau) et le thirame (5 gr/m² à raison de 160 gr de ma/hl d'eau) (Soutrenon et Perrin, 1988). Cinq cent graines sont semées au niveau de chaque traitement. Nous avons réalisé une répétition de quatre blocs comme indiqué dans la figure 1.

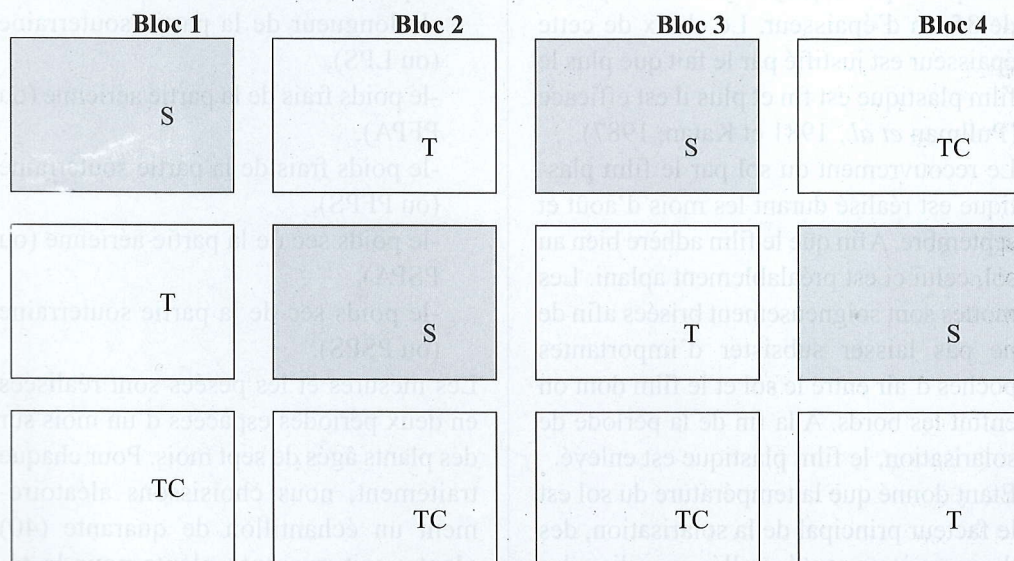


Figure 1 : Schéma du protocole expérimental réalisé dans la pépinière de Baïnem (T = témoin, S = solarisé, TC = traitement chimique).

2.2. Réalisation des semis

Le substrat utilisé dans la pépinière pour la réalisation des semis est composé d'un mélange de 1/3 de fumier ovin, 1/3 de sable de rivière et de 1/3 de terre végétale. Il est rempli manuellement dans des sachets en polyéthylène transparent de 7cm de diamètre et de 20cm de profondeur. Chaque traitement comporte 100 sachets dans lesquels nous semons 500 graines, à raison de 5 graines par sachet. Le nombre de graines élevé semées par sachet se justifie par les grandes pertes engendrées par la maladie, très souvent, dévastatrice et qui pourraient entraver le déroulement de l'expérimentation.

2.3. Application du recouvrement plastique ou solarisation du sol

La planche à solariser est recouverte d'un film plastique en polyéthylène transparent de 35µm d'épaisseur. Le choix de cette épaisseur est justifié par le fait que plus le film plastique est fin et plus il est efficace (Pullman *et al.*, 1981 et Katan, 1987).

Le recouvrement du sol par le film plastique est réalisé durant les mois d'août et septembre. Afin que le film adhère bien au sol, celui ci est préalablement aplani. Les mottes sont soigneusement brisées afin de ne pas laisser subsister d'importantes poches d'air entre le sol et le film dont on enfuit les bords. A la fin de la période de solarisation, le film plastique est enlevé. Etant donné que la température du sol est le facteur principal de la solarisation, des thermomètres sont installés au milieu des planches expérimentales; à deux niveaux différents; à la surface (3 cm) et en pro-

fondeur (20 cm) du sachet. Les relevés de températures sont effectués au niveau des planches solarisées et témoins à plusieurs heures de la journée, de 11 h jusqu'à 16 h et ceci durant toute la durée de l'essai.

2.4. Etude de la croissance

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'effet de la solarisation du sol sur la croissance ou l'IGR (Increase Growth Response) de plants de pin maritime en pépinière.

Cette IGR est estimée par la mesure de paramètres de la croissance végétative durant les premiers stades de vie de la croissance du plant. (Stapleton et Devay, 1982).

Pour notre part, les paramètres dont nous avons tenu compte sont les suivants :

- le diamètre au collet, la longueur de la partie aérienne (ou LPA),
- la longueur de la partie souterraine (ou LPS),
- le poids frais de la partie aérienne (ou PFPA),
- le poids frais de la partie souterraine (ou PFPS),
- le poids sec de la partie aérienne (ou PSPA),
- le poids sec de la partie souterraine (ou PSPS).

Les mesures et les pesées sont réalisées en deux périodes espacées d'un mois sur des plants âgés de sept mois. Pour chaque traitement, nous choisissons aléatoirement un échantillon de quarante (40) plants, soit quarante plants pour le témoin, et quarante plants pour le traitement par solarisation.

Les plants choisis sont d'abord débarrassés de leur terre puis lavés à l'eau courante.

Les longueurs des parties aériennes et souterraines sont mesurées en tenant compte respectivement de la distance entre le collet et le bourgeon terminal et entre le collet et la coiffe de la racine principale.

En ce qui concerne la détermination des poids frais et sec, les plants sont d'abord sectionnés au niveau du collet de façon à séparer les deux parties. La pesée, du PFPA et du PFPS sont effectuées directement à l'aide d'une balance de précision. Pour la mesure du poids sec, les parties aérienne et souterraine sont emballées séparément dans du papier et sont placés dans une étuve de séchage réglée à 105°C durant une période de 24 heures puis ils sont pesés. Les différentes mesures et pesées effectuées sont répétées trois fois.

2.5. Analyse de la mycoflore totale du sol

Cette analyse a pour but de déterminer les aspects : qualitatif c'est à dire les variations génériques de la mycoflore totale du sol et quantitatif correspondant à la densité des diverses populations fongiques par un comptage de l'ensemble des colonies au niveau des trois traitements : T (témoin), S (essai solarisé) et TC (essai traité chimiquement). La méthode utilisée pour l'analyse de la mycoflore totale du sol ainsi que les techniques de prélèvement des échantillons du sol sont indiquées ci-dessous :

2.5.1. Méthode dite de «Soil-Plate de Warcup»

Pour l'analyse quantitative et qualitative de la mycoflore totale du sol, nous avons opté pour la méthode dite de «soil-plate de Warcup» (Booth, 1971). Celle-ci consiste à mettre dans une boîte de Pétri stérile 5 à 15 mg de sol auquel on ajoute 10 ml d'un milieu Czapeck en surfusion (45°C). Pour obtenir une bonne dispersion des particules de sol, les boîtes de Pétri sont agitées manuellement pendant quelques minutes. Etant donné que nos échantillons de sol se sont avérés relativement riches en argile, nous avons ajouté 1 à 2 gouttes d'eau stérile avant d'ajouter le milieu Czapeck afin de bien disperser les particules de sol (Barron, 1971). Il est à noter que pour chaque échantillon de sol, nous avons réalisé cinq répétitions. Une fois le milieu solidifié, les boîtes sont mises à incuber dans une étuve réglée à 22°C. Au bout du sixième jour d'incubation, les colonies fongiques sont dénombrées puis purifiées et repiquées dans des tubes à essai pour l'identification éventuelle des espèces fongiques.

2.5.2. Techniques de prélèvement des différents échantillons de sol

Afin d'estimer en pépinière forestière l'effet de la solarisation du sol sur la mycoflore tellurique, des échantillons de sol sont prélevés avant et après la mise en place du film plastique. En ce qui concerne le traitement chimique des échantillons de sol ont été également prélevés avant et après l'application des fongicides. La procédure adoptée pour effectuer ces prélèvements est la suivante :

- Prélèvements des échantillons de sol de l'essai traité chimiquement (TC) et du témoin (T) : Nous prélevons du centre de chaque parcelle deux sachets entiers. Le contenu des huit sachets de l'ensemble des quatre blocs est ensuite mélangé dans un grand sachet désinfecté avec de l'alcool à 90. L'ensemble constituant l'échantillon (TC) (blocs traités chimiquement). Dans le cas du témoin, nous appliquons les mêmes méthodes de prélèvement. Les échantillons de sol sont désignés par (T) (blocs témoin).

- Prélèvements des échantillons de l'essai solarisé (S) : Nous adoptons la même méthode pour les prélèvements des échantillons de sol solarisé. Les prélèvements sont effectués à deux niveaux différents, l'un au niveau de la couche superficielle du sol comprise entre 0 et 3 cm (SR) et l'autre à une profondeur située entre 18 à 20 cm de la surface du sol (PR). Les différentes prises réalisées au niveau de la couche superficielle du sol sont mélangées dans un grand sachet désinfecté préalablement à l'alcool à 90°. L'échantillon est désigné de S/SR (sol solarisé de la surface). Idem pour les prélèvements effectués en profondeur où nous obtenons comme précédemment l'échantillon : S/PR (sol solarisé/profondeur).

2.6. Analyse statistique

Une analyse de la variance est effectuée pour l'étude des variations thermiques du

sol et l'étude de l'effet de la solarisation du sol sur la croissance des jeunes plants. Pour pouvoir mettre en évidence la différence entre les traitements, nous utilisons le test de Newman-Keuls au seuil de 5% qui nous permet de comparer les moyennes au sein des divers facteurs étudiés et de classer ainsi les variables dans des groupes homogènes où les éléments constitutifs d'un même groupe ne présentent pas de différences significatives, alors que les groupes entre eux sont significativement différents.

RESULTATS

Les variations des températures maximales journalières

Les variations des températures maximales enregistrées au cours du recouvrement plastique du sol sont représentées sous forme de graphes au niveau de la figure 1.

Variation thermique en fonction de la profondeur du sol

La figure 1 montre que les températures du sol à 3 cm de profondeur sont toujours supérieures à celles à 20 cm. Ceci est valable aussi bien pour les sols solarisés que pour les témoins.

Les écarts des moyennes des températures maximales journalières entre les profondeurs, calculés à partir du tableau I se montrent plus grands dans les sols solarisés. Notons que les écarts thermiques sont de 09,42° C et de 07,35° C respectivement dans les sols solarisés et les témoins.

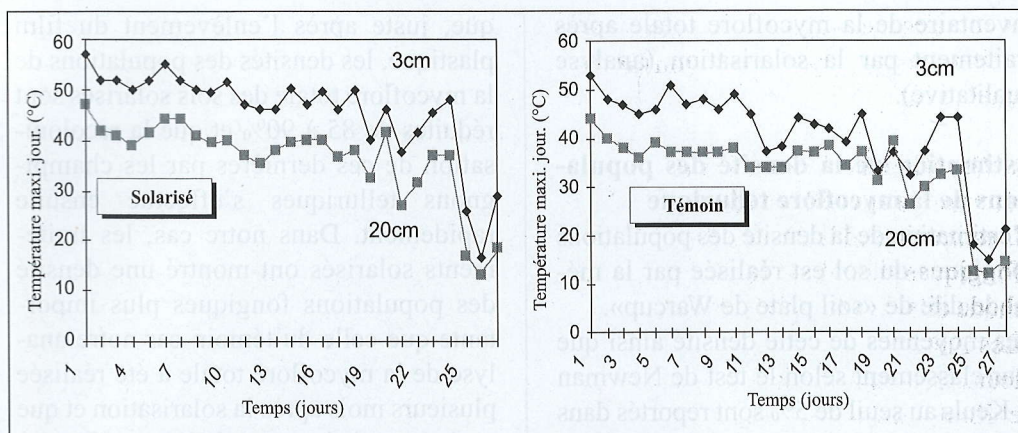


Figure 1 : Les variations des températures maximales journalières en fonction de la profondeur et du traitement du sol.

Variation en fonction du type de traitement du sol

Du moment que l'efficacité de la désinfection solaire est en relation directe avec l'élévation de la température, l'étude des variations thermiques au niveau des sols solarisés et témoins est intéressante à examiner.

Dans tous les cas, on constate une différence de température très nette entre les sols témoins et solarisés et un gain thermique non négligeable en faveur de ces derniers. En effet, le tableau I ci après, montre qu'à une profondeur de 3 cm, les moyennes des températures maximales sont supérieures à 45°C et varient entre 45,32°C et 57,57°C dépassant ainsi celles des sols témoins de 2°C jusqu'à 6°C, alors qu'à 20 cm, elles dépassent les 36°C et sont comprises entre 36,24°C et 43,13°C soit 2,66°C à 5°C de plus que les témoins.

Tableau I : Effet des facteurs profondeur du sol et traitement (solarisé et témoin) sur les variations thermiques du sol.

Traitement		Profondeur (cm)		Groupes homogènes (test de Newman-Keuls)	
		3	20	A	B
Solarisé	Solarisé	45,66	36,24	A	B
	Témoin	40,78	33,43	A	B

La figure 1 indique également que les températures maximales journalières atteintes sous le film de polyéthylène dépassent largement celles des sols témoins et ceci quelque soit la profondeur.

La comparaison des gains thermiques entre le témoin et le sol solarisé montre que ces derniers sont de 4,88°C à 3 cm et de 2,81°C à 20 cm de profondeur.

Analyse de la mycoflore totale du sol

Cette étude a pour but d'estimer la densité des populations telluriques exprimée en CFU (Colony Forming Units) ou nombre de colonies formées par gramme de sol sec (analyse quantitative) et de réaliser un

inventaire de la mycoflore totale après traitement par la solarisation (analyse qualitative).

Estimation de la densité des populations de la mycoflore tellurique

L'estimation de la densité des populations fongiques du sol est réalisée par la méthode dite de «soil plate de Warcup».

Les moyennes de cette densité ainsi que leur classement selon le test de Newman et Keuls au seuil de 5% sont reportés dans le tableau II.

Tableau II : Les moyennes de la densité des populations fongiques ainsi que leur classement selon le test de Newman et Keuls au seuil de 5%.

Types de traitements	Moyennes	Classement
Solarisé 3 cm	01,40	B
Solarisé 20 cm	72,80	A
Témoin	30,20	B
Trait. Chimique	26,40	B

L'analyse quantitative ainsi que les moyennes de cette densité montrent que les populations fongiques sont beaucoup plus nombreuses dans les traitements solarisés que dans le témoin et que les sols traités chimiquement présentent aussi un nombre de colonies relativement supérieur à celui du témoin. L'analyse de la variance de la mycoflore totale révèle que les populations fongiques sont significativement plus élevées ($P < 0,05$) dans les sols solarisés.

Ces résultats sont conformes dans une certaine mesure à ceux obtenus par Stapleton et Devay (1982) qui constatèrent

que, juste après l'enlèvement du film plastique, les densités des populations de la mycoflore totale des sols solarisés sont réduites de 85 à 90% et que la recolonisation de ces dernières par les champignons telluriques s'effectue ensuite rapidement. Dans notre cas, les traitements solarisés ont montré une densité des populations fongiques plus importante que celle du témoin car notre analyse de la mycoflore totale a été réalisée plusieurs mois après la solarisation et que ceci a permis le repeuplement rapide des sols solarisés par les champignons telluriques. Ce phénomène de réinfestation rapide est à rapprocher de celui de la fumigation des sols par le mélange bromure de méthyle et chloropicrine.

Analyse qualitative de la mycoflore du sol

Cette étude vise à compléter l'analyse quantitative au cours de laquelle nous estimons l'importance des densités des populations fongiques du sol. L'analyse qualitative est amplement justifiée ici par le fait que les températures atteintes durant la solarisation sont beaucoup moins brutales que celles obtenues avec d'autres méthodes utilisant la chaleur comme moyen physique de désinfection des sols et par voie de conséquence elles sont plus sélectives à l'égard de la microflore tellurique (Gamliel *et al.*, 1989).

Nous avons dénombré 6 genres (*Aspergillus* Micheli, *Penicillium* Link, *Mucor* Micheli, *Ulocladium* Preuss, *Rhizopus* Ehrenb et *Trichoderma* Pers.) dans les échantillons de sol solarisés, 6 (*Aspergillus*

Micheli, *Rhizopus* Ehrenb, *Mucor* Micheli, *Penicillium* Link, *Trichoderma* Pers. et *Fusarium* Link) dans ceux du témoin et 3 (*Aspergillus* Micheli, *Rhizopus* Ehrenb et *Mucor* Micheli) dans ceux du traitement chimique.

L'inventaire des genres que nous avons isolés après la solarisation dans les trois types de traitement est indiqué dans le tableau III donnée ci dessous. Celui-ci montre que la mycoflore tellurique de sols solarisés est plus importante que celle du témoin où on note l'absence de trois genres (*Trichoderma* Pers., *Paecilomyces* Bainier et *Humicola* Traaen) et de celle des sols traités par les fongicides où *Paecilomyces* Bainier et *Chaetomium* Kunze sont absents.

Ces résultats confirment ceux obtenus par Gamliel *et al.*, (1989) qui ont montré que les champignons thermophiles c'est-à-dire capables de croître à des températures comprises entre 15 et 60°C avec un optimum se situant vers 48°C et thermo-

tolérants c'est à dire ne pouvant pas se développer au delà de 50°C ainsi que les bactéries et les actinomycètes survivent à la solarisation et sont même stimulés par cette dernière. La mycoflore que nous avons inventorié est essentiellement constituée de genres thermotolérants comme *Trichoderma* Pers., *Penicillium* Link et *Aspergillus* Micheli par exemple. Ces champignons ne sont pas signalés dans le témoin.

Plusieurs auteurs (Katan, 1981 ; Stapleton *et al.*, 1987 ; Tjamos et Paplomatas, 1988 ; Gamliel *et al.*, 1989 ; Kaewruang *et al.*, 1989) ont constaté la présence de genres comme *Trichoderma* Pers., *Paecilomyces* Bainier et *Aspergillus* Micheli dans les échantillons de sols solarisés. Ces champignons qui sont doués d'un bon pouvoir compétitif semblent exercer une action antagoniste à l'égard d'autres micro-organismes.

Tableau III : Inventaire des genres isolés au niveau des trois types de traitements.

Genres isolés	Types de traitement		
	Solarisé	Témoin	Trait. Chimique
<i>Aspergillus</i> Micheli	+ ¹	+	+
<i>Penicillium</i> Link	+	+	+
<i>Trichoderma</i> Pers.	+	0 ²	+
<i>Rhizopus</i> Ehrenb	+	+	+
<i>Paecilomyces</i> Bainier	+	0	0
<i>Chaetomium</i> Kunze	+	+	0
<i>Mucor</i> Micheli	+	+	+
<i>Staphylotrichum</i> Meyer et Nicot	+	+	+
<i>Humicola</i> Traaen	+	0	0
<i>Fusarium</i> Link	+	+	+

(1) = Présence, (2) = Absence.

La désinfection solaire semble donc causer un « vide biologique partiel » qui tend à être recolonisé par les micro-organismes les plus compétitifs et qu'au cours du temps la balance microbienne évolue le plus souvent en faveur des antagonistes.

Estimation de l'effet de la solarisation du sol sur la croissance des plants

L'étude de l'effet de la solarisation sur la croissance des semis du pin maritime a porté sur les paramètres suivants : le diamètre au collet, la longueur, le poids frais et sec des parties aériennes et souterraines. Les mensurations ainsi que les pesées sont effectuées à la 29^{ème} semaine et à la 34^{ème} semaine sur des plants âgés de 7 mois. Chaque paramètre a été estimé sur une moyenne de 40 plants choisis au hasard.

Les résultats de l'effet de la solarisation du sol sur la croissance des plants de pin maritime sont indiqués dans le tableau IV. Afin d'estimer les différences entre les deux traitements solarisé et témoin, nous réalisons une analyse de la variance et un classement des différents paramètres selon le test de Newman-Keuls au seuil de 5%. Les résultats du classement sont présentés dans le tableau II.

Il ressort de ce tableau que la solarisation du sol n'affecte ni le diamètre au collet, ni la longueur de la partie aérienne. Ces deux paramètres évoluent pratiquement de la même manière au niveau des deux traitements. Les différences entre les deux traitements ne sont pas statistiquement significatives pour chacun des paramètres. Par contre, pour la partie souterraine,

l'analyse de la variance montre une différence significative ($P = 0.03$) entre les deux traitements particulièrement au bout de la 34^{ème} semaine. En effet, le système racinaire des plants témoins atteint une longueur moyenne de 17,16 cm contre 19.14 cm des plants solarisés.

Par ailleurs, l'étude des poids frais et sec des plants montre une variation entre les deux traitements. Le poids frais de la partie aérienne augmente significativement ($P = 0.038$) à la 34^{ème} semaine atteignant une moyenne de 3.16 gr chez les plants du traitement solarisé contre 2.61 gr chez les témoins. En ce qui concerne le poids sec de la partie aérienne, on note qu'il n'y a pas de différence entre les deux traitements ($P > 0.05$).

Le poids frais de la partie souterraine ne montre pas de grandes variations entre les deux traitements par contre le poids sec augmente significativement chez les plants développés en sols solarisés ($P = 0.04$) au bout de la 34^{ème}.

L'analyse statistique révèle un effet positif de la solarisation du sol sur la croissance des plants de pin maritime plus particulièrement en ce qui concerne les paramètres longueur et poids sec. La plupart des travaux indiquent que la solarisation a un effet bénéfique sur la croissance des plants (Stapleton et Devay, 1982 ; Katan *et al.*, 1983, Cooley, 1983, 1985, Hildebrand, 1987, 1989 ; Arora et Pandey, 1989 ; Moens et Benaïcha, 1990 ; Abu-ghabieh *et al.*, 1991, Jiminez-Diaz *et al.*, 1991, Sarhan, 1991 ; Gamliel *et al.*, 1993, Gruenzweiz *et al.*, 1993).

Tableau IV : Effet de la solarisation du sol sur la croissance de semis de pin maritime.

Paramètres	Traitements	Moyennes		Classement*
		29 ^{ème} semaine	34 ^{ème} semaine	
Diamètre au collet	Témoin	2,14	2,58	
	Solarisé	2,34	2,42	
Longueur de la partie aérienne	Témoin	8,12	10,33	
	Solarisé	8,01	10,39	
Longueur de la partie souterraine	Témoin	17,71	17,16	B
	Solarisé	18,79	19,14	A
Poids frais de la partie aérienne	Témoin	1,68	2,61	B
	Solarisé	1,77	3,16	A
Poids frais de la partie souterraine	Témoin	0,69	1,26	
	Solarisé	0,74	1,39	
Poids sec de la partie aérienne	Témoin	0,51	0,90	
	Solarisé	0,51	0,97	
Poids sec de la partie souterraine	Témoin	0,22	0,36	AB
	Solarisé	0,28	0,40	A

(*) : Classement selon le test de Newman-Keuls au seuil de 5%

DISCUSSION GENERALE

L'étude des variations des températures journalières maximales montre que celles-ci sont plus élevées près de la surface de sol et diminuent avec la profondeur. Elles sont supérieures à 45°C dans les couches superficielles des sols solarisés (3cm) et dépassent celles des sols témoins de 2°C jusqu'à 6°C. Dans les couches plus profondes du sol (20cm), les températures sont supérieures à 36°C et

dépassent celles du témoin de 2 à 5°C. L'utilisation de cette technique a donc permis d'obtenir des gains de températures assez intéressants. L'ensemble des études réalisées à travers différentes régions du monde montre, également, des gains thermiques au niveau des sols solarisés. C'est ainsi qu'en Palestine les températures enregistrées dans les sols solarisés et à des profondeurs de 5 et 20 cm ont été respectivement de 45°C à 55°C et de 39°C à 45°C (Grinstein *et al.*,

1979 ; Jacobsohn *et al.*, 1980). En Californie, les températures du sol enregistrées après solarisation ont atteint 60°C à 5 cm de profondeur (Pullman *et al.*, 1979).

En plus des gains thermiques, nous avons remarqué que l'écart des températures maximales entre les deux profondeurs choisies (3 cm et 20 cm) s'est avéré plus élevé dans les sols solarisés. Cet écart est de l'ordre de 2°C.

Parallèlement à cela, des changements microbiologiques sont induits dans les sols traités par solarisation. Nos résultats indiquent que les densités des populations fongiques restent relativement élevées après la solarisation du sol et que, par la suite, elles augmentent significativement par rapport à celles des sols témoins ($P < 0,05$). Ces densités sont également élevées dans les sols traités chimiquement si celles-ci sont comparées aux témoins. Stapleton et Devay (1982) qui aboutirent aux mêmes résultats, remarquèrent que les populations fongiques initialement très faibles après l'enlèvement du plastique, recolonisent rapidement le sol après quelques mois.

Etant donné que les températures atteintes durant la solarisation du sol sont relativement douces, les effets sur la microflore tellurique sont plus sélectifs (Gamliel *et al.*, 1989). La méthode dite de «soil-plate» de Warcup que nous avons adoptée pour notre étude de la mycoflore totale du sol a montré que les champignons qui reviennent fréquemment étaient des *Aspergillus* Micheli. D'autres genres comme *Fusarium* Link, *Penicillium* Link, *Trichoderma* Pers., *Paecilomyces* Bainier,

Chaetomium Kunze, *Rhizopus* Ehrenb, *Mucor* Micheli, *Humicola* Traaen et *Staphylotrichum* Meyer et Nicot sont également isolés.

La mycoflore inventoriée dans les sols solarisés est constituée essentiellement de genres thermotolérants et thermophiles. Ces résultats sont compatibles avec ceux de Stapleton et Devay (1982), Dwivedi et Dudey (1987), de Gamliel *et al.*, (1989) et de Abu-gharbieh *et al.*, (1991). Par ailleurs, les populations fongiques sont généralement plus diversifiées dans les sols solarisés. En effet, dans les couches superficielles (3 cm de profondeur) où les températures atteintes sont plus élevées, la mycoflore tellurique est plus riche par rapport au nombre de genres rencontrés. L'étude de la mycoflore tellurique totale dans les sols solarisés montre la présence fréquente de genres antagonistes tel que *Trichoderma* Pers., *Aspergillus* Micheli et *Paecilomyces* Meyer et Nicot. Cette catégorie fongique composée d'espèces thermotolérantes et compétitives recolonisent rapidement les sols solarisés. (Stapleton *et al.*, 1987 ; Tjamos et Paplomatas, 1988 ; Gamliel *et al.*, 1989 ; Kaewruang *et al.*, 1989). D'autre part, plusieurs espèces de *Fusarium* Link qui nous ont apparu morphologiquement différentes sont isolées à partir des sols solarisés. Leur identification ainsi que l'étude de leur pathogénicité seraient fort intéressantes car selon certains travaux, la désinfection du sol par solarisation affecte l'agressivité de certains champignons. De plus, certains auteurs (Stapleton et Devay, 1981 ; Martyn

et Hartz, 1986) ont constaté qu'en ce qui concerne le genre *Fusarium* Link, la solarisation favorise le développement des espèces saprophytes au dépend de celles pathogènes.

Durant la solarisation du sol, les températures du sol sont suffisamment élevées pour devenir létales pour les agents nuisibles du sol, pour améliorer ses propriétés chimiques et physiques et pour créer, temporairement, une nouvelle balance microbiologique. La nouvelle balance, caractérisée par une multiplication des populations des antagonistes et des promoteurs de la croissance (*Bacillus* et *Pseudomonas fluorescens*), peut fournir une sorte de protection au sol et les racines des plantes de la recolonisation par les microorganismes pathogènes.

Comparée aux autres traitements (vapeur ou steaming, la fumigation, etc.), la solarisation du sol peut être considérée comme un traitement relativement doux (Katan, 1987 ; Stapleton et Devay, 1986). Néanmoins, un large spectre de pathogènes, nématodes et mauvaises herbes et autres pathogènes sont contrôlés par la solarisation du sol (Katan, 1981 ; Stapleton et Devay, 1986 ; Azouaoui et Kedad, 1999). Le phénomène de l'IGR était fréquemment observé dans les sols solarisés (Katan, 1981 ; 1987 ; Gamliel et Katan, 1991 ; Stapleton et Devay, 1984 ; Gamliel *et al.*, 1989, Stapleton et Garza-Lopez 1988).

La solarisation du sol durant huit semaines s'est accompagnée d'une amélioration de la croissance des plants de pin maritime. En effet, il a été démontré que

le recouvrement plastique du sol affecte la croissance en agissant sur la hauteur et/ou le poids et ceci en fonction du type de culture. C'est ainsi que sur les cultures maraîchers c'est la hauteur de la partie aérienne qui est affectée (Katan *et al.*, 1983 ; Abu-gharbie *et al.*, 1991 ; Gruenzweiz *et al.*, 1993). Par contre sur le melon, Jimenez-Diaz *et al.*, (1991) notent une amélioration du poids sec du fruit après deux mois de solarisation alors que Sarhan (1991) constate sur la fève un accroissement de la longueur des pousses et du poids sec des parties aériennes des plants. De leur côté, Stapleton et Devay (1982) observèrent des augmentations de croissance chez des semis de pêcher et du noyer. Elles sont estimées respectivement de 25 et 12% pour la hauteur et de 43 et 59% pour le poids, 11 mois après plantations dans les sols solarisés.

En ce qui concerne les essences forestières, Stapleton et Devay (1982) signalent, de plus, sur les feuillus (*Juglans regia* L. et *Prunus persica* L.) une augmentation de la moyenne de la longueur et du poids frais des plants. Chez les résineux, Cooley (1984) montre qu'une solarisation de quatre semaines n'affecte pas la croissance du *pin ponderosa*. D'un autre côté, Croghan *et al.*, (1984) constatent que la solarisation affecte la longueur et le poids sec respectivement des plants de pin rouge et de pin blanc. De son côté Cooley (1985) note une élévation significative du poids sec du sapin de Douglas après une durée de la solarisation de 6,5 semaines.

En ce qui concerne notre étude, nous avons constaté qu'une solarisation de huit semaines améliore la longueur et le poids sec du système racinaire ainsi que le poids frais de la partie aérienne de plants de pin maritime. Il se trouve que ces deux derniers paramètres définissent les critères d'adaptation des plants au stress hydrique (Binet et Brunel ; 1967) Laquelle adaptation est réalisée grâce à la capacité de certains végétaux à accumuler l'eau dans leur partie aérienne, à la réduction de leur surface d'évaporation ainsi qu'au bon développement du système racinaire par rapport à la partie aérienne. Nous tenons à signaler qu'il serait très intéressant de vérifier encore une fois ces résultats sur le pin maritime et de reprendre le travail sur des espèces qui pourraient s'adapter aux zones semi-arides et arides.

L'interprétation des effets de la désinfection du sol sur la croissance pourrait trouver une explication dans les changements chimique, physique et biologique qu'elle engendre. En effet, l'ensemble des transformations apportées à la composante biotique et abiotique du sol est impliqué dans le développement d'un environnement amélioré pour la croissance des plants dans les sols désinfectés entraînant automatiquement l'IGR.

Du point de vue chimique la désinfection du sol entraîne souvent une augmentation des concentrations des ions nutritifs dans la solution du sol. En effet, les concentrations des nitrates des ions Fe^{3+} , Mn^{2+} , et Cu^{2+} solubles dans l'eau augmentent dans les sols solarisés, alors que le phosphore reste inchangé. En fait, une augmentation

des concentrations des ions NO_3^- et des micro-éléments peut contribuer dans le phénomène de l'IGR observé après désinfection du sol (Stapleton *et al.*, 1985).

Sur le plan microbiologique, les modifications affectent les plantes soit indirectement, en accroissant ou en diminuant les éléments nutritifs, ou directement par leur effets sur les organismes bénéfiques tels que les mycorhizes, les antagonistes, et les bactéries fixatrices d'azote (Kaewruang *et al.*, 1989 ; Stapleton *et al.*, 1987, 170 ; Tjamos et Paplomatas ; 1988 ; Azouaoui et Kedad ; 1999).

CONCLUSION

La solarisation du sol est un processus hydrothermique qui réalise une pasteurisation du sol par chauffage répété de façon journalière à des températures relativement basses. L'expérimentation de ce procédé est réalisée durant deux mois, dans une pépinière du littoral algérien (Baïnem) avec pour objectif l'évaluation des apports de la méthode quant à l'amélioration de la qualité (croissance) des plants de pin maritime produits.

L'étude montre que durant les deux mois de recouvrement polyéthylénique, les températures du sol augmentent; dépassant une moyenne de 45°C au niveau des couches superficielles (3 cm). Elles diminuent avec la profondeur (20 cm) où elles sont de 36°C .

L'utilisation de cette technique a donc permis d'obtenir des gains de températures assez intéressants de l'ordre de 4°C en moyenne dans les sol solarisés.

La solarisation du sol a également améliorée la croissance des semis de *Pinus pinaster* Aït. en leur conférant les caractéristiques d'adaptation au manque d'eau par le développement en longueur et en poids sec du système racinaire et l'accumulation de l'eau au niveau de la partie aérienne. Il serait, d'ailleurs très intéressant d'approfondir l'étude dans ce sens en élargissant le champs de travail aux changements chimiques et physiques qui accompagnent les changements biologiques au niveau du sol avant et après sa solarisation.

Par ailleurs, il serait également très intéressant de réaliser un suivi du comportement des plants après transplantation et de rechercher ses caractéristiques chez d'autres essences forestières dont l'extension géographique en zone aride est souhaitable. Enfin, le phénomène de L'IGR associé à l'action de la solarisation prouvée sur différents agents phytopathogènes consolident la rentabilité économique de cette technique de désinfection en pépinière forestière.

Summary

Soil solarisation, technique of soil disinfection, utilizes the sun's energy to heat moist soil. Transparent polyethylene film allows the solar radiation to be transmitted directly to the soil and also reduces moisture loss from the soil through evaporation.

Soil solarization was tested during the two hottest months of the year in a nursery located at Algerian littoral (Baïnem). The technique reveals beneficial effects

on the qualitative aspect of the production of *Pinus pinaster* Aït. It was noted an improvement of the quality of the produced seedlings of *Pinus pinaster* Aït. Indeed, the soil solarization caused a stimulation of the growth in height and biomass of the seedlings of *Pinus pinaster* Aït. Moreover, the seedlings develop characteristics specific to the plants adapted to the hydrous stress.

Key words : Disinfestation of the soil, growth, *Pinus pinaster* Aït, soil solarization.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABU-GHARBIEH, W. I., SALEH, H., et AL-BANNA, L., 1991 : Application of solar-heated water for soil solarization .p. 69-77. In "soil solarization." Eds., J. E., Devay, J. J., Stapleton, et C. L., Elmore. FAO plant production and protection. Paper 109. Rome. 396 pp.

ANNESI, T., et MOTTA, E., 1994 : Soil solarization in an Italian forest nursery. *Euro. J. of forest pathol.*, 24 (4) : 203-209.

ARORA, D. K., ET PANDEY, A. K., 1989 : Effects of soil solarization on *Fusarium* Wilt of chickpea. *J. of phytopathol.*, 124 : 13-22.

AZOUAOUI G. et KEDAD A., 1999 : Effets de la solarisation du sol sur les fontes de semis du pin Maritime en pépinière forestière ; Thèse de magister en sciences agronomiques, INA d'El Harrach.

BARRON, G. L., 1971 : Soil fungi. In «methods in microbiology». Ed. C. Booth. T : 4. Academic press. London and NY 405-426p.

BINET P., BRUNEL J-P ; 1967 : Physiologie végétale. Tome I ed. Doin et Deren et Cie 239p.

BOOTH C., 1971 : Methods in microbiology. Vol. 4 ; Academic press. London and NY 49-91p.

COOLEY, J. S., 1983 : Soil solarization in a forest nursery for the control of nursery pests. USDA. Fors. Serv., Pacific NW region. For. Pest manag. Rep., 15 p. Portland, Or.

COOLEY, J. S., 1985 : Evaluation of solarization and fumigation at the J. Herbert Stone nursery. USDA. Fors. Serv., Pacific NW region. For. Pest manag. Rep., 16 p. Portland, Or.

CROGHAN, C. F., GREBACSH, J., et JACOB, R., 1984 : Evaluation of the effectiveness of soil fumigation and solarization on soil-borne organisms and seedling production. USDA. For. Serv. NE area, For. Pest manag., Field note. 84-6, 16p. St. Paul, Minn.

GAMLIEL, A., HADAR, E., et KATAN, J., 1989 : Soil solarization to improve yield of *Gypsophila* in monoculture systems. Acta Hortic. 255 : 131-138.

GAMLIEL, A., HADAR, E., et KATAN, J., 1993 : Improvement of growth and yield of *Gypsophila paniculata* by solarization or fumigation of soil or container medium in continuous cropping systems. Plant disease, 77(9) : 933-938.

GRINSTEIN, A., KATAN, J., ABDUL RAZIK, A., ZEYDAN, O, ET ELAD, Y., 1979 : Control of *Sclerotium rolfsii* and weeds in peanuts by solar heating of the soil. Plant dis. reporter, 63 : 1056-1059.

GRUENZWEIG, J. M., RABINOWITCH, H. D., et KATAN, J., 1993 : Physiological and developmental aspects of increased plant growth in solarised soils. *Ann. of App. Bio.*, 122(3) : 579-591.

HILDEBRAND, D. M., 1987 : Soil solar heating for pest control at Colorado and Nebraska forest tree nurseries. p. 177-185. In current topics in forest research proceedings of the symposium (Gainesville, Flor., Nov. 4- 6). USDA. For. Serv. Gen. Tech. Rep. Se. 46, 197p. Se. For. Exp. Sta., Gainesville, Flor.

HILDEBRAND, D. M., 1989 : A review of Soil solar heating in western forest nurseries. USDA. For. Serv. Proceedings, Intermountain forest nursery association. Bismarck, North Dakota. Dec. p. 49-51.

JACOBSON, R., GREENBERGER, A., KATAN, J., LEVI, M., et ALON, H., 1980 : Control of egyptian broomrape (*Orobanche aegyptiana*) and other weeds

by means of solar heating of the soil by polyethylene mulching. *Weed Sci.*, 28 : 312-316.

JIMENEZ-DIAZ, R. M., BEJARANO, J., BLANCO, M. A., GOMEZ, J., GONZALEZ, R., et MELERO, J. M., 1991: Control of *Verticillium* wilt and *Fusarium* wilt diseases by soil solarization in southern Spain. In "soil solarization". Eds., J.E., Devay, J. J., Stapleton, and C. L., Elmore. FAO plant production and protection. Paper 109. Rome. 396 pp.

KAERUANG, W., SIVASITHAMPARAM, K., et HARDY, G. E., 1989 : Use of soil solarization to control root rots in gerberas (*Gerbera jamesonii*). *Bio. Fert. Soils*, 3 : 38-47.

KATAN, J., 1981: Solar heating (solarization) of soil for control of soil-borne pests. *Ann. Rev. phytopathol.*, 19 : 211-236.

KATAN, J., FISHLER, G., ET GRINSTEIN, A., 1983 : Short and long-term effects of soil solarization and crop sequence on *Fusarium* wilt and yield of cotton in Israël. *Phytopathology*, 73 : 1215-1219.

KATAN, J., 1987 : Soil solarization. p.77-105. In "Innovation approaches to plant disease control". I. Chet, Ed. John Wiley & sons. N.Y., 472p.

MOENS, M., et BEN AÏCHA, B., 1990 : Control of pepper wilt in Tunisia. *Parasitica*, 46 (4) : 103-109.

PULLMAN, G. S., DEVAY, J. E., GARBBER, R. H., et WEINHOLD, A. R., 1979 : Control of soil-borne fungal pathogens by plastic tarping of soil. In *soil-borne plant pathogens*. pp. 439-446. Ed. B., Schippers and W., Gams. London, N. Y., S. Fransisco, Academic press. 686 p.

SARHAN, A. R., 1991 : Control of *Fusarium solani* in broad bean by solar heating of the soil in northern Iraq. p. 108-117. In "soil solarization". Eds., J.E., Devay, J. J., Stapleton, and C. L., Elmore. FAO plant production and protection. Paper 109. Rome. 396 pp.

STAPLETON, J. J., ET DEVAY, J. E., 1982 : Effect of soil solarization on populations of selected soil-borne micro-organisms and growth of deciduous fruit tree seedlings. *Phytopathology*, 72 : 323-326.

STAPLETON, J. J., et DEVAY, J. E., 1984 : Thermal components of soil solarization as related to changes in soil and root microflora and increased plant growth response. *Phytopathology*, 74 : 255-259.

STAPLETON, J. J., QUICK, J., et DEVAY, J. E., 1985 : Soil solarization : effect on soil properties, crop fertilizers and plant growth. *Soil Biol. and Biochem.*, 17 : 369-373.

STAPLETON, J. J., ET DEVAY, J. E., 1986 : Soil solarization : a non-chemical approach for management of plant pathogens and pests. *Crop Prot.* 5 (3) : 190-199.

STAPLETON, J. J., LEAR, B., et DEVAY, J. E., 1987 : Effect of combining soil solarization with certain nematicides on target and non-target organisms and plant growth. *Ann. Appl. Nematol.*, 1 : 107-112.

STAPLETON, J. J., et GARCIA-LOPEZ, J. G., 1988 : Mulching of soils with transparent (solarization) and black polyethylene films to increase growth of annual and perennial crops in south-western Mexico. *Trop. Agric.*, 65 : 29-33.

TJAMOS, E. C., et PAPLOMATAS, E. J., 1988 : Long term effect of soil solarization in controlling *Verticillium* wilt of globe artichokes in Greece. *Plant Pathol.*, 37 : 507-515.

WILHELM, S., 1966 : Chemical treatments and inoculum potential of soil, *Annu. Rev. Phytopathol.*, 4, 53.