

Consultez les discussions, les statistiques et les profils d'auteurs pour cette publication sur : <https://www.researchgate.net/publication/366823597>

Utilisation de modèles de distribution d'espèces (SDM) pour estimer l'adéquation des Zone méditerranéenne européenne non indigène pour l'établissement de *Toumeyella Parvicornis* (Hémiptère : Coccidae)

Article dans *Insectes* · Janvier 2023
DOI: 10.3390/insects14010046

CITATIONS

6

6 auteurs, dont :



Nicolò Di Sora

Université de Toscie

24 PUBLICATIONS 52 CITATIONS

[VOIR LE PROFIL](#)



Luca Rossini

Université Libre de Bruxelles

68 PUBLICATIONS 370 CITATIONS

[VOIR LE PROFIL](#)

LECTURES

225



Robert Mann

Université de Sassari

34 PUBLICATIONS 302 CITATIONS

[VOIR LE PROFIL](#)



Mario Contarini

Université de Toscie

80 PUBLICATIONS 704 CITATIONS

[VOIR LE PROFIL](#)

Article

Utilisation de modèles de distribution d'espèces (SDM) pour estimer la Adéquation de la zone méditerranéenne non indigène européenne à la Établissement de *Toumeyella Parvicornis* (Hemiptera : Coccidae)

Nicolò Di Sora ^{1,†} , Roberto Mannu ^{2,†} , Luca Rossini ^{1,3,*} , Mario Contarini ^{1,*}, Diego Gallego ⁴  et Stefano Speranza ¹ 

- ¹ Département des Sciences Agricoles et Forestières, Université de Tuscia, Via San Camillo de Lellis snc, 01100 Viterbo, Italie
- ² Département d'Agriculture, Université de Sassari, Viale Italia 39A, 07100 Sassari, Italie Service
- ³ d'Automatique et d'Analyse des Systèmes, Université Libre de Bruxelles, v. FD Roosevelt 50, CP 165/55, 1050 Bruxelles, Belgique
- ⁴ Département d'Ecologie, Université d'Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante,

Espagne * Correspondance : luca.rossini@unitus.it (LR); contarini@unitus.it (MC) † Ces auteurs ont contribué à parts égales à ce travail.

Résumé simple : Prévoir la distribution des espèces est une étape fondamentale pour la mise en place d'actions de contrôle opportunes. L'adéquation du milieu à l'établissement de l'espèce est encore plus importante dans le cas d'insectes invasifs, tels que *Toumeyella parvicornis* (Hemiptera, Coccidae). Cette espèce est un insecte à cochenille molle originaire d'Amérique du Nord, récemment introduit en Italie et en France, où il s'est établi et s'est propagé, provoquant des infestations nuisibles sur les plants de pin parasol (*Pinus pinea* L.).

Certains aspects de sa biologie, comme le chevauchement de plusieurs générations et la fécondité élevée, peuvent contribuer à en faire une espèce invasive à succès lorsqu'elle se trouve dans un environnement approprié. Ceci est confirmé par les observations effectuées dans le centre de l'Italie, où le climat et les conditions environnementales semblent propices au développement de l'espèce. Pour éviter une propagation plus poussée dans le bassin méditerranéen, il serait utile d'identifier les zones les plus propices en tenant compte des variables bioclimatiques, comme cela est généralement fait dans le cas des espèces invasives. Nous avons préparé des cartes de répartition potentielle des ravageurs des zones européennes en utilisant des modèles de répartition des espèces. Ces informations apportent des détails supplémentaires au rapport récemment publié par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA). Les zones les plus propices à l'espèce sont situées le long des côtes, où se trouvent la plupart des pins méditerranéens. Cette correspondance suggère un risque élevé de dispersion généralisée et fournit des informations utiles pour la mise en œuvre de stratégies de gestion de ce ravageur nuisible.

Résumé : La cochenille du pin, *Toumeyella parvicornis*, est un insecte originaire de la région néarctique qui est capable d'infester plusieurs espèces de *Pinus*. Elle peut provoquer l'affaiblissement, la défoliation et, à des niveaux d'infestation élevés, la mort des arbres. Après son premier signalement en Italie en 2015, le ravageur s'est rapidement propagé dans les zones environnantes et a été signalé en France en 2021. En raison de la menace que ce ravageur représente pour les pins, l'adéquation des zones du bassin méditerranéen européen à *T. parvicornis* à différentes échelles spatiales a été estimée en construisant des modèles de distribution des espèces (SDM) utilisant des variables bioclimatiques. Nos résultats ont montré que plusieurs zones côtières du bassin méditerranéen pourraient convenir à *T. parvicornis*. Sur la base de l'évaluation des performances, tous les SDM testés ont fourni une bonne représentation de l'adéquation des zones non indigènes méditerranéennes européennes à *T. parvicornis* à différentes échelles spatiales. En particulier, la plupart des zones présentant un niveau d'adéquation moyen ou élevé correspondaient à l'aire de répartition géographique de différentes espèces de *Pinus* en Europe. Prédire l'adéquation des zones méditerranéennes européennes à *T. parvicornis* fournit un outil fondamental pour la détection précoce et la gestion de la propagation de ce ravageur en Europe.

Mots clés : tortue du pin ; espèces exotiques ; pin parasol ; modèles de distribution des espèces ; invasion biologique



Citation : Di Sora, N. ; Mannu, R. ; Rossini, L. ; Contarini, M. ; Gallego, D. ; Speranza, S. Utilisation des espèces Modèles de distribution (SDM) pour Évaluer l'adéquation des normes européennes Zone méditerranéenne non indigène pour l'établissement de *Toumeyella Parvicornis* (Hemiptera : Coccidae). *Insectes* 2023, 14, 46. <https://doi.org/10.3390/insectes14010046>

Rédacteur académique : Andrés Millán

Reçu le 2 décembre 2022

Révisé le 23 décembre 2022

Accepté : 30 décembre 2022

Publié le 3 janvier 2023



Copyright : © 2023 par les auteurs. Titulaire de licence MDPI, Bâle, Suisse. Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions du Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

1. Introduction La cochenille du pin, *Toumeyella parvicornis* (Cockerell) (Hemiptera : Coccidae), est un insecte suceur de sève qui infeste plusieurs espèces appartenant au genre *Pinus* (Pinaceae) [1,2]. La cochenille du pin, *Toumeyella parvicornis* est un insecte très commun sur les arbres résineux, et les femelles adultes (Figure 1) ont tendance à coloniser principalement les aiguilles, et les femelles adultes hivernent généralement en tant qu'insecte fécondé vivant indigène plutôt que dans leurs cocons [3,4]. *Toumeyella parvicornis* a 2 stades hivernaux dans leur cycle de vie, les femelles fécondées hivernent dans les cocons pendant 2 à 3 semaines, puis émergent en tant qu'adultes fécondés. Les nymphes hivernales sont présentes en grand nombre dans les cocons pendant l'hiver, et les femelles hivernales et quatre mâles sexuels sont présents au stade imaginal, généralement défini comme « rampant », *T. parvicornis* est sessile [2,6]. Le premier stade préimaginal, généralement défini comme « rampant », *T. parvicornis* est sessile [2,6].



Figure 1. Femme adulte de *Toumeyella parvicornis*.

Toumeyella parvicornis est originaire de la région méditerranéenne, où elle a été trouvée pour la première fois en France en 1847 [5] puis signalée dans le département de la Corse [7-10], au Canada [12]. Ces dernières années, l'invasion de ce ravageur a été signalée dans d'autres pays méditerranéens, notamment aux États-Unis [13] de Barcelone [14] et en Espagne [15]. Les îles Turques et Caïques [2], Puerto Rico [16] et le premier signal de ce ravageur en Europe [17] ont été observés en Italie [14]. En Europe, l'espèce a été signalée pour la première fois en France en 1847 [5] et a été documentée sur des arbres *Pinus pinaster* dans la région de Campanie. Elle s'est rapidement propagée dans toute l'Italie [14] et a été signalée en France [15].

Les préoccupations dans toute la communauté scientifique. En fait, les attaques de *T. parvicornis* provoquent des dommages importants à la communauté scientifique. En fait, les attaques de *T. parvicornis* peuvent survenir [16]. Les populations de *Toumeyella parvicornis* peuvent rapidement atteindre des densités élevées, ce qui entraîne une importante chute de production de résine. Les populations de ce ravageur constituent une grande préoccupation pour la sécurité alimentaire des citoyens à un niveau élevé, et la santé dans les espaces verts urbains. De plus, *T. parvicornis* produit une grande quantité de miellat, qui peut déranger les utilisateurs des parcs urbains, en particulier en milieu urbain [16]. La quantité de miellat, qui peut perturber les usagers des parcs urbains, en particulier dans les zones urbaines, il recouvre les structures et les monuments. La mise en œuvre de stratégies de surveillance est d'une importance capitale, principalement parce que les pins sont très courants dans les zones urbaines, où les mesures de contrôle peuvent être fortement limitées par les lois européennes même lorsque les infestations de parasites peuvent mettre en danger la sécurité des citoyens [19].

Bien que *Pinus banksiana* Lamb représente l'hôte principal de *T. parvicornis* dans la région néarctique [11,20], cet insecte peut se développer sur différentes espèces de *Pinus* dans des zones non indigènes. Par exemple, dans les îles Turques-et-Caïques, le pin des Caraïbes [*Pinus caribaea* var. *bahamensis* (Grisebach) WH Barrett & Golfari] est l'hôte principal de ce ravageur [2], alors qu'en Europe

Le pin parasol (*Pinus pinea* L.) est son hôte principal [6]. *Pinus pinaster* Aiton a montré une faible sensibilité à la cochenille du pin, tandis que *Pinus halepensis* Mill. n'était apparemment pas sensible à ses infestations [6].

Parmi les différents outils statistiques et mathématiques, les modèles de distribution des espèces (SDM) représentent l'outil le plus largement utilisé dans le domaine de la recherche en écologie et en biologie de la conservation pour évaluer la distribution potentielle d'une espèce. En particulier, les SDM facilitent notre compréhension des relations espèce-environnement et estiment la distribution potentielle des espèces également dans les zones où l'espèce n'a pas encore été observée [21–23].

Bien que les SDM ne rapportent aucune information sur la dynamique temporelle de la diffusion d'une espèce [24], ils sont largement utilisés pour faire des projections sur l'adéquation de différents environnements géographiques aux espèces exotiques envahissantes [25–29], également dans le cas d'un échantillon de petite taille [30].

L'identification des zones les plus propices à l'invasion d'une espèce pourrait aider activement les autorités locales, les techniciens et les communautés à définir les zones à risque d'invasion et où la surveillance devrait être améliorée. Pour cette raison, l'objectif de ce travail était d'estimer l'adéquation potentielle des zones méditerranéennes non indigènes européennes à *T. parvicornis*.

En particulier, différentes approches SDM ont été utilisées pour identifier la propagation potentielle de la cochenille du pin en Italie et en Europe sur la base de la distribution connue et des variables bioclimatiques. La comparaison entre différentes SDM visait à fournir un meilleur scénario de la distribution potentielle de cette espèce dans les zones méditerranéennes européennes.

2. Matériels et méthodes

2.1. Enregistrements d'occurrences et variables bioclimatiques

Les coordonnées géographiques des occurrences de *T. parvicornis* en Europe méditerranéenne ont été obtenues à partir de la littérature et en Italie centrale par une surveillance directe dans les zones de culture du pin parasol. En particulier, les rapports des services régionaux de protection des végétaux de la région de Campanie [disponibles sur <http://agricoltura.regione.campania.it/> (consulté le 1er décembre 2022)] et la base de données de l'Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (OEPP) [15] ont été utilisées pour extraire les occurrences de la cochenille tortue du pin dans le centre de l'Italie et dans le sud de la France, respectivement. En Italie centrale, des enregistrements de *T. parvicornis* ont également été acquis en surveillant les zones de croissance et les arbres de pin parasol dans les parcs urbains de la région du Latium de décembre 2021 à janvier 2022. Dans un premier temps, des sites d'échantillonnage représentant les zones de croissance et les arbres urbains de *P. pinea* ont été choisis au hasard à partir d'une carte de répartition disponible pour la région du Latium [31] et du logiciel Google Earth [disponible sur <https://earth.google.com/web/> (consulté le 1er décembre 2022)]. À chaque endroit sélectionné, les infestations de *T. parvicornis* ont été évaluées en inspectant visuellement les arbres à la recherche de symptômes typiques (c.-à-d. présence de moisissure noire sur la couronne, détérioration des plantes, aiguilles jaunâtres et desséchées comme indiqué sur la figure 2). Une lunette monoculaire à un grossissement de 40× a été utilisée pour détecter l'insecte sur les plantes symptomatiques, tandis que les aiguilles et les branches au sol ont été examinées pour évaluer la présence d'adultes de *T. parvicornis* et/ou de résidus de mue. Au total, 52 et 53 enregistrements d'occurrence de *T. parvicornis* ont été trouvés respectivement en Italie et en Europe (matériaux supplémentaires, tableau

2.2. Variables bioclimatiques

Dix-neuf variables bioclimatiques ont été obtenues à partir de la base de données mondiale sur le climat WorldClim (version 1.4) [<http://www.worldclim.org> (consulté le 1er décembre 2022)] sous forme de fichiers raster géoréférencés [32]. Des images géoréférencées avec une résolution spatiale de 30 arc-sec (~1 km²) et 2,5 arc-min (~4,5 km²) ont été utilisées pour modéliser la distribution potentielle de *T. parvicornis* en Italie et en Europe, respectivement. Avant l'analyse, les images raster ont été découpées pour couvrir la même zone fixe à l'aide du logiciel QGIS (version 3.24) [disponible sur <http://qgis.org> (consulté le 1er décembre 2022)]. La multicollinéarité entre les variables bioclimatiques a été testée à une résolution spatiale de 30 arc-sec (~1 km²) en utilisant les coefficients de corrélation de Pearson afin de supprimer les variables fortement corrélées ($R^2 > 0,80$ ou $R < -0,80$) avant d'exécuter les modèles (matériaux supplémentaires Tableau S2). Les tests de multicollinéarité nous ont conduit à ne sélectionner que neuf variables bioclimatiques (Tableau 1).



Figure 2. Symptômes sur des plants de *Pinus pinea* infestés par *Toumeyella parvicornis* : arbre mourant (en haut) et brindille infestée de femelles adultes, de miellat et de moisissure (en bas).

2.2. Variables bioclimatiques

Tableau 1. Liste des variables bioclimatiques prises en compte pour la modélisation. Les variables utilisées dans les modèles de répartition des espèces (SDM) sont indiquées en gras. Dix-neuf variables bioclimatiques ont été obtenues à partir des modèles climatiques mondiaux (SDM) de WorldClim.

Base de données (version 1.4) [<http://www.worldclim.org> (consulté le 1er décembre 2022)] sous forme de

fichiers raster géoréférencés [32]. Images géoréférencées avec une résolution spatiale de 30 arc- Description

sec (1 km²) et 2,5 arc-min (4,5 km²) ont été utilisés pour modéliser la température moyenne annuelle

répartition en Italie et en Europe, respectivement. Avant l'analyse, les images raster étaient Plage de

découpe pour couvrir la même zone fixe en utilisant le logiciel GDAL (version 2.14) (disponible sur <http://gdal.org>

(consulté le 1er décembre 2022)). Multicolinéarité parmi les isothermes bioclimatiques (BIO02/BIO07) ($\times 100$)

Les variables ont été testées à une résolution spatiale de 30 secondes d'arc (1 km²) en utilisant la saisonnalité

coefficients de corrélation afin d'éliminer les variables fortement corrélées ($R^2 > 0,80$ ou R^2

$< -0,80$) avant d'exécuter les modèles (matériel supplémentaire 1). Les tests de multicollinéarité nous ont conduit

à ne sélectionner que neuf variables bioclimatiques (tableau 1) température minimale du mois le plus froid

Tableau 1. Liste des variables bioclimatiques prises en compte pour la modélisation (BIO05-BIO09) utilisées dans les

modèles de distribution des espèces (SDM) sont indiquées en gras.

température moyenne du trimestre le plus humide

Variable	Description
BIO09	Température moyenne du trimestre le plus sec
BIO10	Température moyenne annuelle
BIO11	Température moyenne du trimestre le plus chaud
BIO12	Plage de température diurne moyenne [Moyenne mensuelle (température maximale - température minimale du trimestre le plus froid) (temp)]
BIO13	Précipitations annuelles
BIO14	Isothermie (BIO02/BIO07) ($\times 100$)
BIO15	Précipitations du mois le plus humide
BIO16	Précipitations du mois le plus sec
BIO17	Saisonnalité des précipitations (coefficient de variation)

Tableau 1. Suite

Variable	Description
BIO16	Précipitations du trimestre le plus humide
BIO17	Précipitations du trimestre le plus sec
BIO18	Précipitations du trimestre le plus chaud
BIO19	Précipitations du trimestre le plus froid

2.3. Modélisation de la distribution des

espèces Quatre algorithmes différents ont été utilisés pour estimer la distribution potentielle de *T. parvicornis* en Italie et en Europe : le modèle linéaire généralisé (GLM), les splines de régression adaptative multivariée (MARS), la forêt aléatoire (RF) et MaxEnt [33,34]. Les modèles ont été implémentés à l'aide du package biomod2 [35] dans le logiciel R (version 4.1.3) [36].

Les algorithmes GLM, MARS et RF nécessitent des enregistrements de pseudo-absences en plus des points d'occurrence. Par conséquent, 1000 enregistrements de pseudo-absences, situés à au moins 500 m des points d'occurrence, ont été générés. Ce processus a été répété 3 fois, obtenant ainsi trois ensembles de données différents de pseudo-absences pour chaque algorithme. Les paramètres de modèle par défaut dans biomod2 ont été utilisés pour ajuster les algorithmes GLM, MARS et RF.

L'algorithme MaxEnt peut être appliqué en considérant uniquement les enregistrements de présence au lieu des données de présence-absence [37], ce qui implique l'utilisation de fonctions non linéaires complexes [38]. La complexité du modèle peut être contrôlée par un ensemble de paramètres appelés classes de caractéristiques (FC) et multiplicateur de régularisation (RM). Les FC visent à améliorer l'ajustement du modèle [38] et consistent en une transformation des variables prédictives d'origine qui peuvent être utilisées séparément ou en combinaison [c'est-à-dire linéaire (L), quadratique (Q), charnière (H), produit (P) et seuil (T)], tandis que le RM vise à réduire le surajustement [39].

La paramétrisation dans MaxEnt est nécessaire car les modèles ajustés avec des paramètres par défaut conduisent souvent à des projections biaisées par rapport aux modèles paramétrés [39–42]. Pour cette raison, vingt modèles différents ont été ajustés en considérant 4 combinaisons FC (L, LQ, LQH, H) et des valeurs RM allant de 1 à 5. Toutes les occurrences enregistrées disponibles et 1000 points d'arrière-plan positionnés au hasard ont été utilisés pour l'ajustement du modèle. Le modèle le mieux adapté aux données a été sélectionné sur la base du critère d'information d'Akaike avec une correction de petite taille d'échantillon (AICc) [43], qui reflète à la fois la qualité d'ajustement et la complexité du modèle [44].

Traditionnellement, la valeur AICc la plus basse indique le modèle le mieux adapté à l'ensemble de données considéré [44,45]. La paramétrisation a été réalisée à l'aide du package ENMeval [45] dans le logiciel R.

2.4. Évaluation et prévisions du modèle

Pour tous les modèles testés, 80 % des données ont été utilisées pour l'étalonnage, tandis que les 20 % restants ont été utilisés pour les tests de performance, comme cela est traditionnellement appliqué pour l'application et la modélisation SDM [29,46,47].

Les performances du modèle ont été évaluées en prenant en compte l'aire sous la courbe (AUC), la caractéristique de fonctionnement du récepteur (ROC) et la compétence statistique réelle (TSS). En bref, l'AUC mesure la capacité de discrimination entre les présences et les absences et varie de 0 à 1. Les valeurs d'AUC supérieures à 0,8 et 0,9 indiquent respectivement de bonnes et d'excellentes performances [48–51]. Le TSS mesure la précision de classification d'un modèle par rapport à une valeur seuil et varie entre -1 et 1. Les valeurs TCC de -1 et 1 indiquent respectivement l'absence de correspondance et une correspondance complète entre les observations et les prédictions [52].

Enfin, les probabilités de distribution obtenues par les modèles ont été projetées à l'aide du logiciel QGIS pour évaluer visuellement le niveau d'adéquation des pays européens au développement de *T. parvicornis*. Les variables ayant les plus grandes contributions à la distribution de *T. parvicornis* ont été classiquement divisées en « classes d'adéquation » allant de

adéquation (S) « très faible » à « très élevée », comme suit : $S < 0,2$ = très faible, $0,2 \leq S < 0,4$ = faible, $0,4 \leq S < 0,6$ = intermédiaire, $0,6 \leq S < 0,8$ = élevé et $S \geq 0,8$ = très élevé.

3. Résultats

3.1. Habitat propice à *T. parvicornis* en Italie

Les résultats des pondérations de contribution des variables bioclimatiques dans l'estimation de la L'adéquation des zones italiennes à *T. parvicornis* variait selon le modèle utilisé.

les variables influençant le plus la distribution de *T. parvicornis* en Italie étaient BIO01 (c.-à-d. température moyenne annuelle) et BIO12 (c'est-à-dire les précipitations annuelles) pour le modèle GLM, BIO01 et BIO03 (c'est-à-dire l'isothermie) pour le modèle MARS, BIO03 et BIO01 pour le modèle RF, et BIO01 et BIO15 (c'est-à-dire la saisonnalité des précipitations) pour le modèle MaxEnt (tableau 2).

Tableau 2. Contribution relative de chaque variable bioclimatique au modèle linéaire généralisé (GLM), Modèle de régression adaptative multivariée (MARS), modèle MaxEnt et forêt aléatoire (RF) modèle pour estimer l'adéquation de l'Italie à *Toumeyella parvicornis*.

Variable bioclimatique	¹	GLM	MARS	MaxEnt	RF
BIO01		19,74%	32,30%	33,12%	26,47%
BIO02		6,40%	4,61%	3,07%	1,76%
BIO03		10,18%	20,37%	14,17%	32,35%
BIO04		6,05%	1,23%	5,14%	1,47%
BIO08		12,96%	2,65%	7,36%	5,59%
BIO09		5,77%	11,54%	3,66%	5,29%
BIO12		16,12%	2,21%	12,55%	7,06%
BIO15		12,18%	17,92%	16,56%	10,88%
BIO19		10,60%	7,17%	4,38%	9,12%

¹ Voir le tableau 1 pour les acronymes.

Évaluation des performances des SDM lors de la détermination des zones adaptées à *T. parvicornis* en Italie, les valeurs AUC et TSS ont été utilisées. Tous les modèles ont fourni d'excellentes performances considérant que les valeurs de l'AUC étaient supérieures à 0,93, indiquant une forte capacité à prédire la distribution potentielle de *T. parvicornis* en Italie. Cependant, le modèle RF (AUC = $0,99 \pm 0,01$; TSS = $0,96 \pm 0,04$) a eu les meilleures performances par rapport aux autres modèles testés (MARS : ASC = $0,97 \pm 0,02$, TSS = $0,93 \pm 0,05$; MaxEnt : ASC = $0,96 \pm 0,05$, TSS = $0,90 \pm 0,10$; GLM : ASC = $0,96 \pm 0,07$, TSS = $0,90 \pm 0,10$).

Les prévisions du modèle pour la péninsule italienne sont présentées dans la figure 3. Malgré les différences, tant dans le poids des variables bioclimatiques que dans le pouvoir prédictif, aucune des différences dans la prédiction de la zone la plus appropriée pour *T. parvicornis* ont été identifiées parmi les SDM testés. La zone de distribution potentielle de *T. parvicornis* était principalement concentrée autour des zones côtières des régions du Latium, de Campanie et de Toscane (Figure 3). des zones à forte adéquation ont été trouvées dans la région de Sardaigne par GLM, MARS et MaxEnt modèles, alors que seul le modèle GLM prédisait une zone de forte adéquation au milieu de Régions des Pouilles et de la Calabre.

Les différences les plus importantes entre les prédictions du modèle concernaient les zones les moins propices (Figure 3) où le modèle MARS a étendu la distribution potentielle plus que la d'autres modèles. Au contraire, la distribution potentielle estimée par le modèle RF était assez restreint.

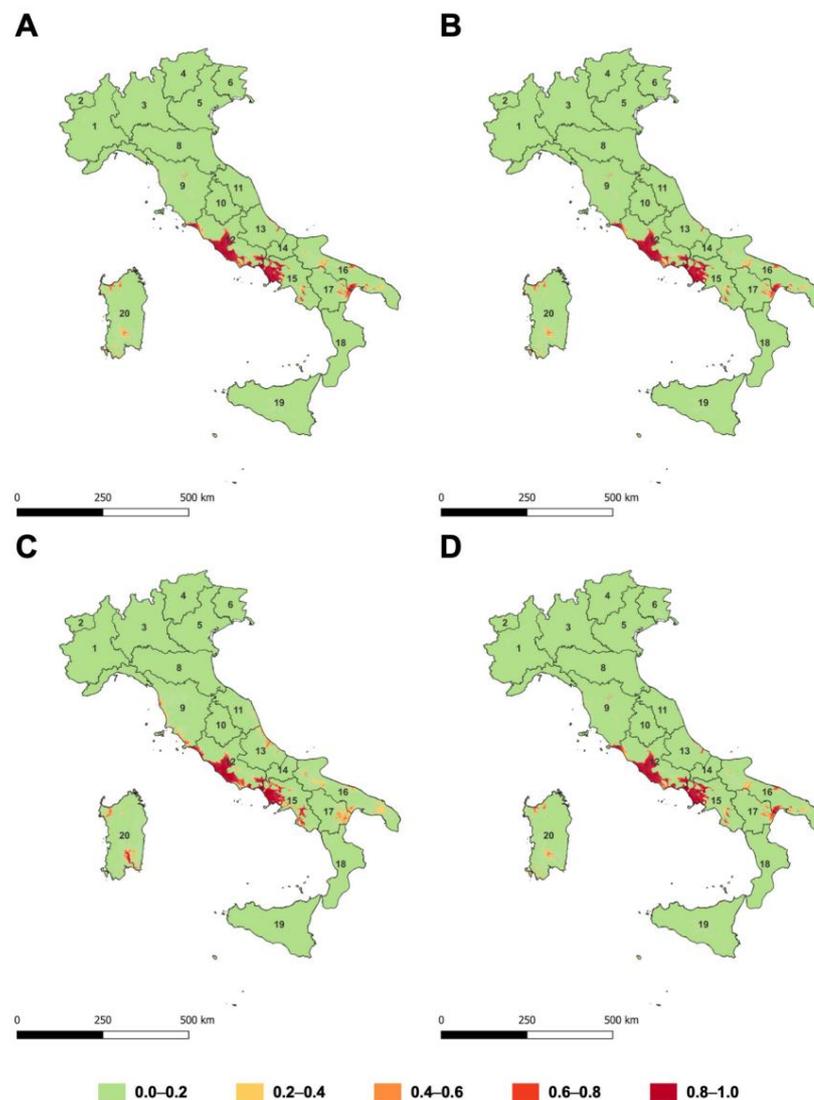


Figure 3. Répartition des zones propices à *Toumeyella parvicornis* en Italie en fonction des variables bioclimatiques (A), des splines de régression adaptative multivariée (MARS) (B), du modèle MaxEnt (C) et du modèle de forêt aléatoire (RF) (D). Les différentes couleurs indiquent les « classes »

« basées sur l'adéquation » (voir la légende ci-dessous) : foncé d'adéquation »

orange = élevé rouge = très élevé. Les chiffres sur les cartes se réfèrent aux régions administratives italiennes (1 = Piémont ; 2 = Valle Piémont ; 3 = Vallée d'Aoste ; 4 = Lombardie ; 5 = Vénétie ; 6 = Frioul-Vénétie d'Aoste ; 7 = Ligurie ; 8 = Emilie-Romagne ; 9 = Toscane ; 10 = Ombrie ; 11 = Marches ; 12 = Latium ; 13 = Abruzzes ; 14 = Molise ; 15 = Campanie ; 16 = Pouilles ; 17 = Basilique ; 18 = Calabre ; 19 = Sicile ; 20 = Sardaigne).

3.2. Les différences les plus importantes entre les méditerranéenne et européenne

zones à plus faible aptitude (figure 3) où le modèle MARS a étendu la distribution potentielle plus que la Commune déjà noté pour l'Italie, la contribution des variables bioclimatiques dans l'estimation d'autres modèles. Au contraire, la distribution potentielle estimée par le modèle RF était assez restreint.

parmi les modèles testés. Le BIO01 (c'est-à-dire la température moyenne annuelle) et le BIO19 (c'est-à-dire précipitations du trimestre le plus froid) étaient les variables les plus importantes affectant la distribution de *T. parvicornis* pour les modèles GLM et MARS (tableau 3). La répartition bioclimatique les variables contribuant le plus aux projections dans le modèle MaxEnt étaient BIO15 (c.-à-d.

saisonnalité des précipitations) et BIO19, alors que ceux qui contribuent le plus dans le modèle RF étaient BIO01 et BIO19. Parmi toutes les variables bioclimatiques considérées, BIO02 (c'est-à-dire la moyenne plage de température diurne) et BIO04 (c'est-à-dire la saisonnalité de la température) ont montré des résultats limités contribution à l'estimation de la distribution potentielle des espèces (tableau 3).

Tableau 3. Contribution relative de chaque variable bioclimatique au modèle linéaire généralisé (GLM), Modèle de régression adaptative multivariée (MARS), modèle MaxEnt et forêt aléatoire (RF) modèle pour estimer l'adéquation de l'Europe méditerranéenne à *Toumeyella parvicornis*.

Variable bioclimatique	¹	GLM	MARS	MaxEnt	RF
BIO01		35,73%	35,13%	2,88%	15,64%
BIO02		8,44%	14,39%	10,20%	1,82%
BIO03		3,49%	2,86%	14,94%	4,73%
BIO04		6,36%	1,77%	2,64%	15,27%
BIO08		3,54%	0,64%	11,28%	11,27%
BIO09		6,49%	11,62%	6,66%	12,73%
BIO12		11,36%	2,27%	15,42%	12,00%
BIO15		4,49%	12,30%	20,76%	9,09%
BIO19		20,09%	19,02%	15,24%	17,45%

¹ Voir le tableau 1 pour les acronymes.

Sur la base de l'AUC et du TSS, le modèle MARS représentait le mieux l'ensemble de données disponible (ASC = 0,98 ± 0,03 ; TSS = 0,96 ± 0,06), suivi de GLM (ASC = 0,97 ± 0,04 ; TSS = 0,94 ± 0,07), MaxEnt (AUC = 0,97 ± 0,03 ; TSS = 0,94 ± 0,07) et RF (AUC = 0,97 ± 0,03 ; TSS = 0,94 ± 0,07), qui ont montré des valeurs très similaires.

Une description visuelle des résultats est fournie dans la figure 4. Comme déjà observé dans les projections italiennes, les zones les plus propices à *T. parvicornis* dans la zone méditerranéenne européenne étaient concentrées dans la zone côtière (figure 2). Compte tenu des prévisions globales du modèle, les zones les plus adaptées étaient la côte de la mer Tyrrhénienne en Italie, la Côte d'Azur et la côte balkanique de la mer Adriatique. En outre, une extension pertinente du potentiel la distribution prédite par les modèles se situait dans la zone nord-ouest de la péninsule ibérique couvrant à la fois le Portugal et l'Espagne. Contrairement aux autres modèles, GLM et MARS ont indiqué des zones très adaptées à *T. parvicornis* le long de la côte est de l'Espagne également.

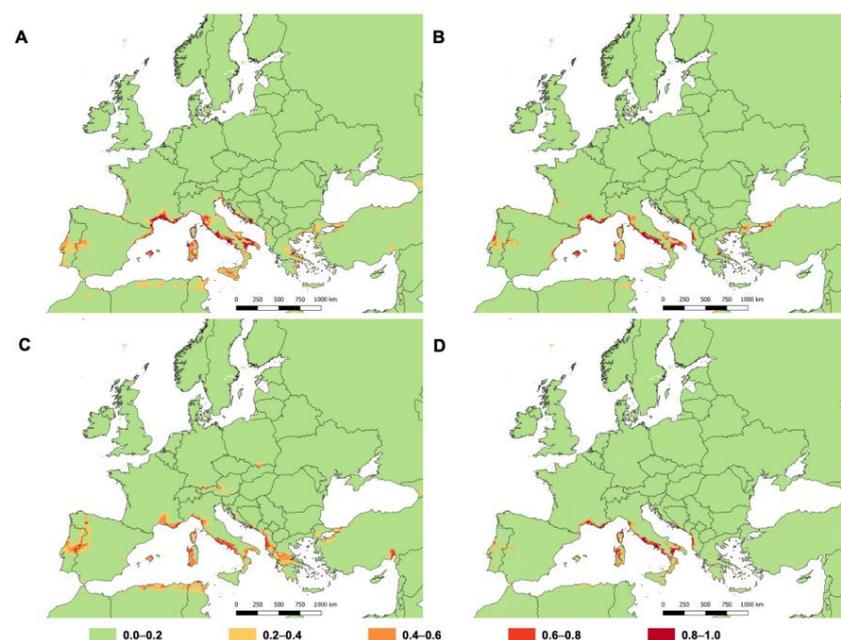


Figure 4. Répartition des zones propices à *Toumeyella parvicornis* en Europe méditerranéenne d'après les variables bioclimatiques utilisant le modèle linéaire généralisé (GLM) (A), régression adaptative multivariée (MARS) (B), modèle MaxEnt (C) et modèle Random Forest (RF) (D). Différentes couleurs indiquent les « classes d'aptitude » (vert = très faible ; jaune = faible ; orange clair = intermédiaire ; orange foncé = élevé ; rouge = très élevé).

4. Discussion

La détection récente de *T. parvicornis* en Italie et en France a suscité de sérieuses inquiétudes quant à la diffusion potentielle de ce ravageur sur le continent européen, y compris dans la région méditerranéenne. Notre étude a estimé pour la première fois les zones les plus propices à la propagation potentielle de l'espèce au cours des prochaines années en utilisant une répartition de l'espèce

4. Discussion

Français La détection récente de *T. parvicornis* en Italie et en France a soulevé de sérieuses inquiétudes quant à la diffusion potentielle de ce ravageur à travers le continent européen, y compris la région méditerranéenne. Notre étude a estimé pour la première fois les zones les plus propices où l'espèce pourrait potentiellement se propager dans les prochaines années en utilisant une approche de modélisation de la distribution des espèces. Les SDM sont un outil puissant et largement utilisé pour prédire les zones où une espèce peut potentiellement se développer et se propager [29,53–57]. Tous les modèles testés ont démontré une bonne précision pour estimer l'adéquation des pays européens méditerranéens à *T. parvicornis*, et la variabilité des précisions était exclusivement due aux différences de fonctions d'ajustement entre les modèles basés sur la régression (par exemple, GLM, MARS) et les modèles non paramétriques (par exemple, RF) [42].

Français D'après notre étude, la température moyenne annuelle a joué un rôle fondamental dans l'explication des projections d'adéquation de l'habitat pour *T. parvicornis* en Italie, en particulier dans les modèles GLM, MARS et MaxEnt. Cette information est d'une importance fondamentale dans le cadre d'un scénario de changement climatique, comme déjà indiqué pour d'autres espèces nuisibles infestant les environnements agricoles et forestiers, telles que *Philaenus spumarius* L. (Hemiptera : Aphrophoridae) [57], *Lobesia botrana* (Denis & Schiffermüller) (Lepidoptera : Tortricidae) [58] et *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera : Gelechiidae) [59]. Nos résultats sont également conformes aux conclusions de Solhjouy-Fard et al. [60] et Yan et al. [61], où la température moyenne annuelle était la variable expliquant le mieux la distribution potentielle de *Ferrisia virgata* (Cockerell) (Hemiptera : Pseudococcidae), *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera : Aleyrodidae), *Apodiphus amygdali* (Germar) (Hemiptera : Pentatomidae), *Adelphocoris lineolatus* (Goeze) (Hemiptera : Miridae) et *Thrips palmi* Karny (Thysanoptera : Thripidae).

Français Une variable secondaire qui mérite d'être mentionnée pour l'Italie est l'isothermalité, qui était la meilleure variable explicative selon le modèle RF. Cette variable est strictement liée aux zones maritimes, car elle évalue l'écart thermique entre les températures estivales et hivernales [62]. Les zones caractérisées par des hivers plus chauds, comme c'est généralement le cas dans les zones maritimes italiennes, peuvent favoriser le développement de *T. parvicornis* en amenant cette espèce à avoir plus de générations que dans les endroits aux hivers plus froids. En fait, ce phénomène a déjà été observé pour d'autres espèces exotiques, telles que *Nezara viridula* (Linnaeus) (Hemiptera : Pentatomidae) et *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera : Erebidae) [63–67], et peut également se produire avec *T. parvicornis*.

Les résultats des scénarios européens ont fourni des projections plus étendues que celles obtenues qui ne prenaient en compte que l'Italie. En fait, les modèles GLM et MARS ont confirmé que la température était la principale variable explicative à l'échelle spatiale méditerranéenne européenne, tandis que MaxEnt et RF ont considéré la saisonnalité des précipitations et les précipitations du trimestre le plus froid, respectivement, comme les meilleures. La saisonnalité des précipitations est une variable pertinente, surtout dans les zones côtières caractérisées par des anomalies de précipitations au cours des saisons [62] et où le ravageur est déjà présent (par exemple, en France). Cependant, de fortes précipitations en été, lorsque l'activité de *T. parvicornis* est plus élevée, peuvent agir comme un contrôle naturel des stades préimaginaux (c'est-à-dire le rampant). En effet, des pluies intenses peuvent tuer les jeunes stades larvaires et les stades mobiles de cet insecte ou les emporter loin de la plante hôte [16], comme cela a déjà été observé pour d'autres espèces telles que *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) (Hemiptera : Dactylopiidae), *Quadricarifer punctatella* (Motschulsky) (Lepidoptera : Notodontidae) et *Eriogaster lanestris* (Linnaeus) (Lepidoptera : Lasiocampidae) [68–70]. En revanche, les précipitations du trimestre le plus froid sont une variable qui peut affecter la capacité d'hivernage du ravageur. En effet, de fortes pluies en hiver peuvent mécaniquement éloigner les individus hivernants de la plante hôte, influençant ainsi de facto l'abondance de la population du printemps suivant [71].

Nos résultats concordent également avec ceux de Bragard et al. [5], qui ont constaté que les pays européens présentent des caractéristiques propices au développement de ce ravageur, en utilisant la répartition mondiale des types de climat Köppen-Geiger présents dans les zones où *T. parvicornis* est présent comme méthode pour prédire la répartition potentielle de l'insecte.

L'espèce hôte principale de *T. parvicornis* présente en Europe est *P. pinea*. Cette espèce végétale présente une faible diversité génétique [72–74], ce qui peut favoriser la propagation de cet insecte. En fait, une diversité génétique plus faible peut indiquer une sensibilité similaire des plantes au ravageur, surtout dans les monocultures extensives d'espèces de *Pinus*. Cet aspect a déjà été observé dans des champs de monoculture intensive où une faible diversité génétique des plantes a entraîné une sensibilité plus élevée aux stress biotiques et abiotiques [75–77].

Les pins parasols et les pins maritimes sont un élément essentiel des villes en Italie [78] et des paysages côtiers de nombreux autres pays méditerranéens comme la France. Par conséquent, *T. parvicornis* peut potentiellement changer l'esthétique de nombreux endroits si aucune action rapide n'est menée. L'esthétique n'est pas le seul élément qui peut être altéré par l'activité du ravageur, car les infestations de *T. parvicornis* peuvent représenter un problème sérieux là où les pins parasols sont cultivés pour la production de pignons, en particulier dans certaines zones très étendues d'Espagne, du Portugal et de France. Par conséquent, l'interprétation des projections de SDM ne peut ignorer la distribution des plantes hôtes. De ce point de vue, nos résultats sont conformes à la suggestion fournie par l'Autorité européenne de sécurité des aliments [5], indiquant que *T. parvicornis* a le potentiel de s'établir dans toute l'Europe partout où des hôtes appropriés se trouvent. En fait, les zones les plus propices à *T. parvicornis* dans les pays méditerranéens européens estimées par les SDM chevauchaient Insectes 2023, 14, x POUR EXAMEN PAR LES PAIRS avec la distribution de *P. pinea* et *P. pinaster* (Figure 5), qui ont été reconnus comme les principaux hôtes dans les

zones nouvellement envahies en Europe [6].

11 sur 17

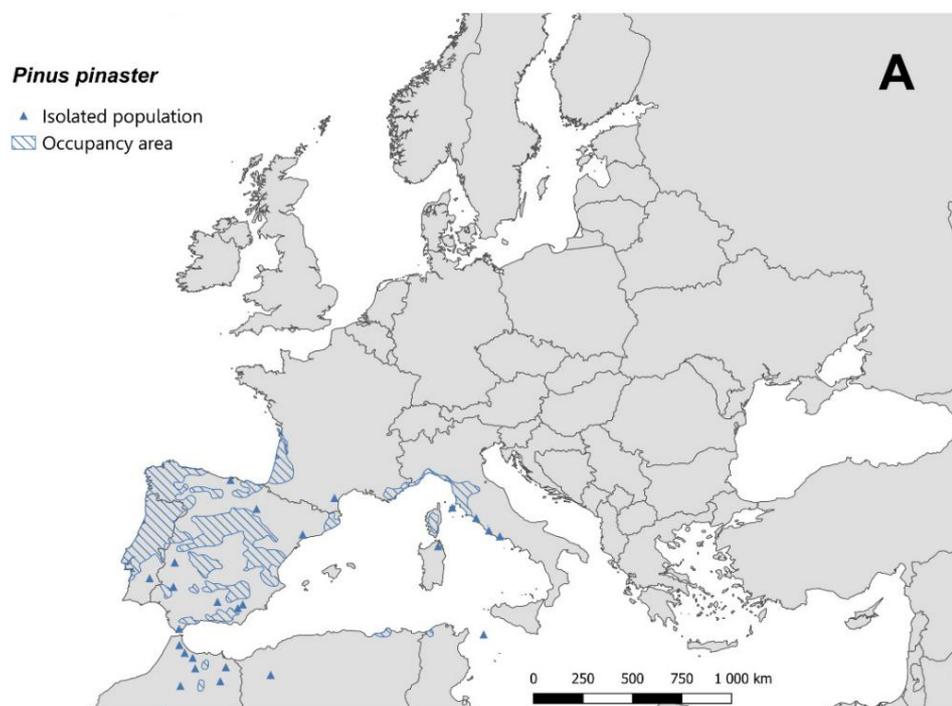


Figure 5. Suite

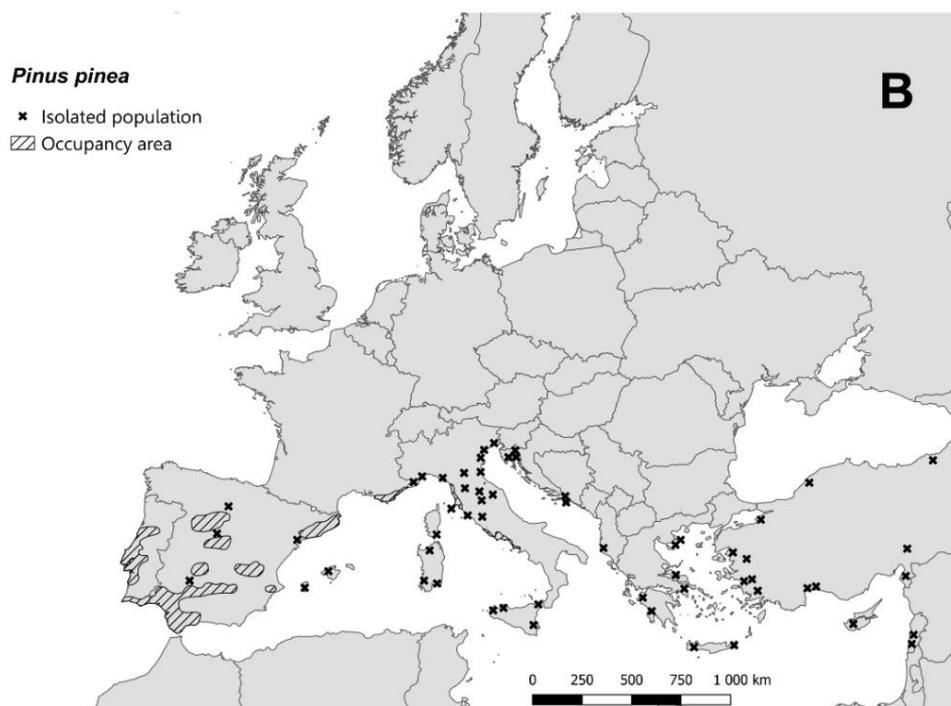


Figure 5. Répartition de (A) *Pinus pinaster* et (B) *Pinus pinea* en Europe selon Gaudullo et al. [79].

À cet égard, sur la base des informations disponibles sur la distribution de l'hôte principal espèces végétales en Italie et en Europe méditerranéenne, nous avons analysé où se situe la propagation potentielle de plus susceptible de se produire, parmi les zones indiquées par les résultats SDM de notre étude de propagation potentielle. Dans les pays méditerranéens, la plupart des espèces de *Pinus* se trouvent dans les zones côtières [79], où la de *T. parvicornis* est plus susceptible de se produire, parmi les zones indiquées par les résultats du modèle SDM, les résultats suggèrent une grande aptitude à la diffusion du ravageur. Dans la péninsule italienne, où les résultats du modèle ont suggéré une grande aptitude à la diffusion des ravageurs. En Italie, dans des environnements naturels et urbains. De plus, les premières détections ont été récemment également été signalées le long de la côte adriatique, en particulier dans les régions des Abruzzes et des Pouilles [15,80]. Selon les résultats du modèle, une attention particulière doit être accordée à la présence extensive de pierres récemment été signalé également le long de la côte adriatique, en particulier dans les Abruzzes et les forêts de pins d'Emilie-Romagne, où *T. parvicornis* peut aggraver les effets délétères actuels activité de *Crisicoccus pini* (Kuwana) (Hemiptera : Pseudococcidae), un autre ravageur envahissant infestant la même plante hôte [81,82]. De même, la Toscane est une autre région italienne couverte de pins parasols où le ravageur a été récemment détecté [83] et où Les résultats du modèle ont indiqué une grande aptitude à la diffusion des ravageurs. Par conséquent, toutes ces espèces italiennes les régions doivent être strictement surveillées afin de réduire rapidement la diffusion de *T. parvicornis* étant donné la présence extensive de plantes hôtes et la grande adéquation indiquées par nos résultats. Un scénario différent concerne la Sardaigne, où *T. parvicornis* n'a pas été détecté mais les pins parasols et les pins maritimes sont largement répandus [84,85], surtout dans le sud partie de la région. Dans ce cas, une surveillance attentive des plants et du bois de pin importés est fondamental pour empêcher l'introduction de ce ravageur sur l'île.

Bien que *T. parvicornis* soit une espèce oligophage strictement liée à un pool restreint des plantes hôtes, elle présente plusieurs caractéristiques d'une espèce invasive idéale. En effet, sa petite taille, La reproduction parthénogénétique et la grande adaptabilité à de nouveaux environnements sont des caractéristiques généralement associée à des ravageurs hautement invasifs [86]. De plus, la taille réduite (jusqu'à 5 mm pour les adultes) de *T. parvicornis* facilite la détection des plantes infestées, en particulier des adultes plantes, très difficile et favorise sa diffusion par le vent. En plus d'être petite, la Les conditions climatiques italiennes et européennes semblent jouer un rôle fondamental dans sa diffusion. Par exemple, en Amérique du Nord, *T. parvicornis* a une génération par an [1,87], alors qu'en Dans les zones plus chaudes, plusieurs générations superposées ont été observées [2,6].

Considérant la répartition de *P. pinea* et de *P. pinaster* en Europe et nos SDM résultats, nous émettons l'hypothèse que la péninsule ibérique pourrait être une autre zone très appropriée

à *T. parvicornis*, étant donné la présence extensive de la plante hôte [88,89]. De vastes forêts et plantations de pins sont présentes au Portugal et en Espagne [79], où elles sont considérées comme une source précieuse de biodiversité [90]. Cependant, les forêts de pins de la péninsule ibérique sont souvent soumises à des stress abiotiques tels que les incendies [91,92] et à des adversités biotiques, telles que le nématode du pin *Bursaphelenchus xylophilus* Nickle (1981) [93,94] ou des espèces de scolytes appartenant au genre *Tomicus* [95,96]. Même si cela n'a pas encore été prouvé, il est probable que *T. parvicornis* pourrait être plus agressif envers les plantes déjà affectées par d'autres adversités.

Il serait fondamental d'obtenir une carte complète et détaillée de la répartition potentielle de *T. parvicornis* dans différentes régions, surtout pour élaborer des stratégies de surveillance et de contrôle rapides. Une stratégie de contrôle précoce permettrait d'éviter certaines conditions dangereuses, comme cela a déjà été observé aux îles Turks et Caicos, où *T. parvicornis* a considérablement réduit la répartition de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* indigène [2]. Outre les actions à court terme qui pourraient être menées sur la base des résultats de cette étude, un aspect secondaire serait pertinent pour un scénario à long terme. Par conséquent, nous émettons l'hypothèse qu'une légère augmentation de la température moyenne annuelle pourrait étendre considérablement les zones propices. En fait, nos prévisions étaient basées sur les conditions climatiques réelles (années 1970-2000) car nous voulions comprendre la propagation potentielle du ravageur dans les prochaines années. La même analyse présentée dans notre travail pourrait être réalisée dans d'autres études en considérant un scénario de changement climatique, comme cela a déjà été réalisé pour d'autres espèces d'insectes nuisibles [9].

En conclusion, nous pensons que le scénario présenté dans ce travail pourrait permettre aux techniciens et aux autorités locales de se concentrer sur les zones les plus sensibles à *T. parvicornis*, les aidant ainsi à gérer correctement ce ravageur nuisible dans la zone méditerranéenne européenne.

Documents supplémentaires : Les documents d'appui suivants peuvent être téléchargés à l'adresse suivante : <https://www.mdpi.com/article/10.3390/insects14010046/s1>, Tableau S1 : Liste des enregistrements utilisés pour estimer l'adéquation de la zone méditerranéenne européenne non indigène pour *Toumeyella parvicornis* à l'aide de modèles de distribution d'espèces (SDM) ; Tableau S2 : Résultats de l'analyse de corrélation de Pearson entre les variables bioclimatiques à une résolution spatiale de 30 secondes d'arc (~1 km²).

Contributions des auteurs : Conceptualisation, NDS, RM, LR, MC, DG et SS ; méthodologie, NDS, RM et LR ; logiciel, NDS et RM ; validation, NDS ; analyse formelle, RM ; investigation, NDS et RM ; ressources, MC, DG et SS ; conservation des données, NDS et RM ; rédaction — préparation de l'ébauche originale, NDS, RM et LR ; rédaction — révision et édition, NDS, RM, LR, MC, DG et SS ; visualisation, NDS et RM ; supervision, MC, DG et SS ; administration du projet, SS ; acquisition de financement, SS Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : NDS est financé par la Région du Latium (Département de l'Agriculture) et l'Università degli Studi della Tuscia (Italie). La recherche a été menée dans le cadre de l'initiative italienne MIUR (Ministère de l'Éducation, de l'Université et de la Recherche) « Département d'excellence » (loi 232/2016). LR et RM sont financés par MUR (Ministère italien de l'Université et de la Recherche) dans le cadre du programme social européen REACT-EU - Programme national pour la recherche et l'innovation 2014-2020.

Déclaration de disponibilité des données : Les données associées à cette publication, ainsi que le script R permettant de reproduire les résultats, sont accessibles au public à l'adresse <https://github.com/lucaros1190/SDM-Toumeyella> (consulté le 1er décembre 2022).

Remerciements : Cet ouvrage rend hommage à Enrico Chiarot, cher collègue et ami qui a consacré une grande partie de son énergie à la sauvegarde des pins parasols de la ville de Rome. Les auteurs remercient Ana Helena Dias Francesconi pour la révision du manuscrit et Simone Menegoni pour son soutien lors des activités de terrain.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Références

1. Hamon, A.; Williams, M. Les cochenilles molles de Floride (Homoptera : Coccoidea : Coccidae); Département de l'agriculture et de l'aquaculture de Floride Services aux consommateurs, Division de l'industrie végétale : Gainesville, Floride, 1984 ; Volume 11.
2. Malumphy, C. ; Hamilton, Massachusetts ; Manco, Benelux ; Vert, motomarine ; Sánchez, MD ; Corcoran, M. ; Salamanque, E. *Toumeyella parvicornis* (Hemiptera:Coccidae), provoquant un grave déclin de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* dans les îles Turques et Caïques. *Source Floride. Entomol.* 2012, 95, 113–119. [\[CrossRef\]](#)
3. Orr, LW Études en station expérimentale agricole sur la lutte naturelle et artificielle contre la cochenille du pin. *Univ. Minn. Agric. Exp. Stn.* 1931, 1–21.
4. Di Sora, N. ; Rossini, L. ; Contarini, M. ; Chiarot, E. ; Speranza, S. Traitement endotherapeutique pour contrôler *Toumeyella parvicornis* Cockerell Infestations sur *Pinus pinea* L. *Pest Manag. Sci.* 2022, 78, 2443–2448. [\[CrossRef\]](#)
5. Bragard, J. ; Baptista, P. ; Chatzivassiliou, E. ; Di Serio, F. ; Gonthier, P. ; Jacques Miret, JA; Fejer Justesen, A. ; Magnusson, CS; Milonas, P. ; Navas-Cortés, JA; et coll. Catégorisation des ravageurs de *Toumeyella parvicornis*. *EFSA J.* 2022, 20, e07146. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
6. Garonne, A. ; Foscarì, A. ; Russo, E. ; Jésus, G. ; Somme, S. ; Cascone, P. ; Guerrieri, E. La propagation de l'écaïlle non indigène de la tortue des pins *Toumeyella parvicornis* (Hemiptera : Coccidae) en Europe : une menace majeure pour *Pinus pinea* dans le sud de l'Italie. *Iforest-Biogeosci. Pour.* 2018, 11, 628–634. [\[CrossRef\]](#)
7. Cockerell, TDA; Quaintance, AL *Coccidae* nouveaux et peu connus de Floride. *Psyche A J. Entomol.* 1897, 8, 89–91. [\[CrossRef\]](#)
8. Stimmel, JF Cochenille du pin, *Toumeyella parvicornis* (Cockerell) (Homoptera : Coccidae). *Regul. Hortic.* 1984, 10, 23–24.
9. Clarke, SR; DeBarr, GL; Liu, TX Toxicités de contact de cinq pyrèthroïdes et de quatre insecticides organophosphorés sur *Toumeyella parvicornis* (Cockerell) rampants. *Can. Entomol.* 1992, 124, 563–564. [\[CrossRef\]](#)
10. Cooper, DD; Cranshaw, WS Biologie saisonnière et ennemis naturels associés de deux *Toumeyella* spp. dans le Colorado. *Sud-ouest. Entomol.* 2004, 29, 39–45.
11. Bradley, GA Effet de *Formica obscuripes* (Hymenoptera : Formicidae) sur la relation prédateur-proie entre *Hyperaspis congressis* (Coleoptera : Coccinellidae) et *Toumeyella numismaticum* (Homoptera : Coccidae). *Can. Entomol.* 1973, 105, 1113–1118. [\[CrossRef\]](#)
12. Myartseva, SN; Ruiz Cancino, E. Une liste de contrôle annotée des Aphelinidae (Hymenoptera : Chalcidoidea) du Mexique. *Folia Entomol. Mex.* 2000, 109, 7–33.
13. Saw-Carmona, AE ; Cabrera-Asencio, I. *Toumeyella parvicornis* (Cockerell) (Hemiptera : Coccoidea : Coccidae) : Une nouvelle espèce envahissante Ravageur des pins à Porto Rico. *J. Agric. Univ. Puerto Rico* 2010, 94, 175–177. [\[CrossRef\]](#)
14. Garonna, AP; Scarpato, S.; Vicinanza, F.; Espinosa, B. Premier signalement de *Toumeyella parvicornis* (Cockerell) en Europe (Hemiptera : Coccidae). *Zootaxa* 2015, 3949, 142–146. [\[CrossRef\]](#)
15. OEPP. Disponible en ligne : <https://gd.eppo.int/taxon/TOUMPA/distribution/IT> (consulté le 1er décembre 2022).
16. Service Phytosanitaire National de Protection des Végétaux, *Toumeyella parvicornis*. Disponible en ligne : <https://www.protezionedellepiante.fr/urgences-phytosanitaires/toumeyella-parvicornis/> (consulté le 1er décembre 2022).
17. Bernetti, G. *Sylviculture spéciale* ; Syndicat turinois de l'édition typographique, Ed.; Unione Tipografico-Editrice Torinese : Turin, Italie, 1995.
18. Ciancio, O. ; Travaglini, D. ; Bianchi, L. ; Mariotti, B. La gestion des forêts côtières de pins parasols : le cas du tomboli de Cecina. Dans les actes du IIIe Congrès forestier national, Taormina, Italie, 16-19 octobre 2008 ; p. 156-162.
19. Mannu, R.; Torres-Vila, LM; Olivieri, M.; Lentini, A. Quand une espèce menacée devient une menace : une clé de lecture de la directive habitats basée sur la présence et la distribution de *Cerambyx cerdo* L. dans les zones urbaines et périurbaines méditerranéennes. *Insect Conserv. Divers.* 2021, 14, 730–735. [\[CrossRef\]](#)
20. Rabkin, F. Études sur la biologie de la cochenille du pin gris du Manitoba *Toumeyella* Sp. (Coccidae Homoptera). Thèse de maîtrise, Université du Manitoba, Winnipeg, MB, Canada, 1939.
21. Guisan, A.; Zimmermann, NE Modèles prédictifs de distribution d'habitats en écologie. *Ecol. Modell.* 2000, 135, 147–186. [\[CrossRef\]](#)
22. Guisan, A.; Thuiller, W. Prédire la distribution des espèces : offrir plus que de simples modèles d'habitat. *Ecol. Lett.* 2005, 8, 993–1009. [\[CrossRef\]](#)
23. Elith, J.; Leathwick, JR Modèles de distribution des espèces : explication et prédiction écologiques dans l'espace et le temps. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2009, 40, 677–697. [\[CrossRef\]](#)
24. Rossini, L.; Bono Rosselló, N.; Contarini, M.; Speranza, S.; Garone, E. Modélisation des populations d'ectothermes en tenant compte de la structure d'âge physiologique et du mouvement spatial : une nouvelle approche. *Ecol. Inform.* 2022, 70, 101703. [\[CrossRef\]](#)
25. Jeschke, JM; Strayer, DL Utilité des modèles bioclimatiques pour l'étude du changement climatique et des espèces envahissantes. *Ann. NY Acad. Sci.* 2008, 1134, 1–24. [\[CrossRef\]](#)
26. Wang, XY; Huang, XL; Jiang, LY; Qiao, GX Prédiction de la distribution potentielle des phylloxéridés du châtaignier (Hemiptera : Phylloxeri- dae) d'après les modèles de niche écologique GARP et Maxent. *J. Appl. Entomol.* 2010, 134, 45–54. [\[CrossRef\]](#)
27. Wang, F.; Wang, D.; Guo, G.; Zhang, M.; Lang, J.; Wei, J. Répartitions potentielles de la balane invasive *Ceroplastes cirripediformis* (Hemiptera : Coccidae) dans le contexte du changement climatique et implications pour sa gestion. *J. Econ. Entomol.* 2021, 114, 82–89. [\[CrossRef\]](#)
28. Sung, S.; Kwon, YS; Lee, DK; Cho, Y. Prédiction de la distribution potentielle d'une espèce invasive, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera : Formicidae), dans le contexte du changement climatique à l'aide de modèles de distribution des espèces. *Entomol. Res.* 2018, 48, 505–513. [\[CrossRef\]](#)
29. Tang, J.; Li, J.; Lu, H.; Lu, F.; Lu, B. Distribution potentielle d'un ravageur invasif, *Euplatypus parallelus*, en Chine, selon Maxent. *Pest Manag. Sci.* 2019, 75, 1630–1637. [\[CrossRef\]](#)

30. Pearson, RG; Raxworthy, CJ; Nakamura, M.; Townsend Peterson, A. Prédire la distribution des espèces à partir d'un petit nombre d'occurrences enregistrées : un cas test utilisant des geckos cryptiques à Madagascar. *J. Biogeogr.* 2006, 34, 102–117. [\[CrossRef\]](#)
31. Chirici, C.; Fattori, F.; Cutolo, C.; Tufano, T.; Couronne, C.; Barbati, B.; Blasi, B.; Copiz, C.; Rossi, R.; Biscontini, B.; et coll. La création de la carte des formations naturelles et semi-naturelles et de la carte forestière typologique de la région du Latium. *Pour. J. Silv. Pour. Ecol.* 2014, 11, 65. [\[CrossRef\]](#)
32. Fick, SE; Hijmans, RJ WorldClim 2 : Nouvelles surfaces climatiques à résolution spatiale de 1 km pour les zones terrestres mondiales. *Int. J. Climatol.* 2017, 37, 4302–4315. [\[CrossRef\]](#)
33. Gong, Z.; Zhang, Y. Qu'attendez-vous vraiment de moi ? Apprentissage généralisé de la récompense avec des croyances biaisées sur la dynamique du domaine. Dans les actes de la conférence AAAI sur l'intelligence artificielle, New York, NY, États-Unis, 3 avril 2020 ; Volume 34, pp. 2485–2492.
34. Kou, J.; Wang, T.; Yu, F.; Sun, Y.; Feng, C.; Shao, X. Le genre de mousse didymodon comme indicateur du changement climatique au Tibet plateau. *Ecol. Indic.* 2020, 113, 106204. [\[CrossRef\]](#)
35. Thuiller, W.; Georges, D.; Engler, R.; Breiner, F. Package 'Biomod2'. Plateforme d'ensemble pour la modélisation de la distribution des espèces. 2016. Disponible en ligne : <https://cran.r-project.org/web/packages/biomod2/biomod2.pdf> (consulté le 1er décembre 2022).
36. Équipe de développement R. R : un langage et un environnement pour le calcul statistique ; Fondation R pour le calcul statistique : Vienne, Autriche, 2022.
37. Phillips, S.; Anderson, R.; Schapire, R. Modélisation de l'entropie maximale des distributions géographiques des espèces. *Ecol. Modell.* 2006, 190, 231–259. [\[CrossRef\]](#)
38. Elith, J.; Graham, CH; Anderson, RP; Dudík, M.; Ferrier, S.; Guisan, A.; Hijmans, RJ; Huettmann, F.; Leathwick, JR; Lehmann, A.; et al. De nouvelles méthodes améliorent la prédiction de la distribution des espèces à partir des données d'occurrence. *Ecography* 2006, 29, 129–151. [\[CrossRef\]](#)
39. Merow, C.; Smith, MJ; Silander, JA Un guide pratique de MaxEnt pour la modélisation des distributions d'espèces : ce qu'il fait et pourquoi les intrants et les paramètres sont importants. *Ecography* 2013, 36, 1058–1069. [\[CrossRef\]](#)
40. Shcheglovitova, M.; Anderson, RP Estimation de la complexité optimale pour les modèles de niche écologique : une approche jackknife pour les espèces avec des échantillons de petite taille. *Ecol. Modell.* 2013, 269, 9–17. [\[CrossRef\]](#)
41. Radosavljevic, A.; Anderson, RP Améliorer les modèles maxent des distributions d'espèces : complexité, surajustement et évaluation. *J. Biogeogr.* 2014, 41, 629–643. [\[CrossRef\]](#)
42. Valavi, R.; Guillera-Arroita, G.; Lahoz-Monfort, JJ; Elith, J. Performances prédictives des modèles de distribution des espèces basés uniquement sur la présence : Une étude de référence avec un code reproductible. *Ecol. Monogr.* 2022, 92, e01486. [\[CrossRef\]](#)
43. Anderson, DR; Burnham, KP Éviter les pièges lors de l'utilisation de méthodes de théorie de l'information. *J. Wildl. Manag.* 2002, 66, 912–918. [\[CrossRef\]](#)
44. Warren, DL; Seifert, SN Modélisation de niche écologique dans Maxent : l'importance de la complexité du modèle et des performances de critères de sélection des modèles. *Ecol. Appl.* 2011, 21, 335–342. [\[CrossRef\]](#)
45. Muscarella, R.; Galante, PJ; Soley-Guardia, M.; Boria, RA; Kass, JM; Uriarte, M.; Anderson, RP ENMeval : Un package R pour effectuer des évaluations spatialement indépendantes et estimer la complexité optimale du modèle pour les modèles de niche écologique Maxent. *Méthodes Ecol. Evol.* 2014, 5, 1198–1205. [\[CrossRef\]](#)
46. Kumar, S.; Graham, J.; West, AM; Evangelista, PH Utilisation des occurrences au niveau du district à maxent pour prédire le potentiel d'invasion d'un insecte nuisible exotique en Inde. *Comput. Electron. Agric.* 2014, 103, 55–62. [\[CrossRef\]](#)
47. Lozano, V.; Marzialelli, F.; Carranza, ML; Chapman, D.; Branquart, E.; Dološ, K.; Große-Stoltenberg, A.; Fiori, M.; Capece, P.; Brundu, G. Modélisation de l'invasion d'Acacia saligna dans une grande île méditerranéenne à l'aide de facteurs PAB : un outil pour la mise en œuvre de la législation européenne sur les espèces invasives. *Ecol. Indic.* 2020, 116, 106516. [\[CrossRef\]](#)
48. Elith, J.; Kearney, M.; Phillips, S. L'art de modéliser les espèces à répartition variable. *Methods Ecol. Evol.* 2010, 1, 330–342. [\[CrossRef\]](#)
49. Freitas, FF; Khosa, CK; Sanz, V. Exploration du modèle standard EFT dans la production VH avec l'apprentissage automatique. *Phys. Rev. D* 2019, 100, 035040. [\[CrossRef\]](#)
50. Dakhil, MA; Xiong, Q.; Farahat, EA; Zhang, L.; Pan, K.; Pandey, B.; Olatunji, OA; Tariq, A.; Wu, X.; Zhang, A.; et al. Indicateurs climatiques passés et futurs pour les schémas de distribution et la planification de la conservation des forêts de conifères tempérées du sud-ouest de la Chine. *Ecol. Indic.* 2019, 107, 105559. [\[CrossRef\]](#)
51. Engelhardt, EK; Neuschulz, EL; Hof, C. Ignorer les interactions biotiques surestime les effets du changement climatique : la réponse potentielle du cassenoix tacheté aux changements du climat et des plantes ressources. *J. Biogeogr.* 2020, 47, 143–154. [\[CrossRef\]](#)
52. Allouche, O.; Tsoar, A.; Kadmon, R. Évaluation de la précision des modèles de distribution des espèces : prévalence, kappa et statistique de compétence réelle (TSS). *J. Appl. Ecol.* 2006, 43, 1223–1232. [\[CrossRef\]](#)
53. Sobek-Swant, S.; Kluz, DA; Cuddington, K.; Lyons, DB Distribution potentielle de l'agrire du frêne : que pouvons-nous apprendre de Modèles de niche écologique utilisant Maxent et GARP ? *Pour. Ecol. Manag.* 2012, 281, 23–31. [\[CrossRef\]](#)
54. Alaniz, AJ; Carvajal, MA; Vergara, PM Des géants arrivent ? Prédire la propagation potentielle et les impacts du frelon asiatique géant (*Vespa mandarinia*, Hymenoptera:Vespidae) aux États-Unis. *Pest Manag. Sci.* 2021, 77, 104–112. [\[CrossRef\]](#)
55. Li, X.; Xu, D.; Jin, Y.; Zhuo, Z.; Yang, H.; Hu, J.; Wang, R. Préviation des répartitions actuelles et futures de *Brontispa longissima* (Coleoptera : Chrysomelidae) dans le contexte du changement climatique en Chine. *Glob. Ecol. Conserv.* 2021, 25, e01444. [\[CrossRef\]](#)
56. Early, R.; Rwomushana, I.; Chipabika, G.; Day, R. Comparaison, évaluation et combinaison de modèles statistiques de distribution des espèces et de CLIMEX pour prévoir la distribution des ravageurs émergents des cultures. *Pest Manag. Sci.* 2022, 78, 671–683. [\[CrossRef\]](#)

57. Godefroid, M.; Morente, M.; Schartel, T.; Cornara, D.; Purcell, A.; Gallego, D.; Moreno, A.; Pereira, JA; Fereres, A. Les tolérances climatiques de *Philaenus spumarius* doivent être prises en compte dans l'évaluation des risques d'épidémies liées à *Xylella fastidiosa*. *J. Pest Sci.* 2022, 95, 855–868. [\[CrossRef\]](#)
58. Ponti, L.; Gutierrez, A.; Boggia, A.; Neteler, M. Analyse de la production de raisin face au changement climatique. *Climat* 2018, 6, 20. [\[CrossRef\]](#)
59. Pont, L.; Gutiérrez, AP; de Fields, M.; Desneux, N.; Biondi, A.; Neteler, M. Évaluation du risque d'invasion biologique de *Tuta absoluta* : méthodes mécanistes versus corrélatives. *Biol. Invasions* 2021, 23, 3809–3829. [\[Référence croisée\]](#)
60. Solhjoui-Fard, S.; Sarafrazi, A.; Minbashi Moeini, M.; Ahadiyat, A. Prédiction de la distribution de l'habitat de cinq espèces hétéroptères nuisibles en Iran. *J. Insect Sci.* 2013, 13, 116. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
61. Yan, Y.; Wang, YC; Feng, CC; Wan, PHM; Chang, KTT Changements potentiels de distribution des espèces envahissantes de ravageurs des cultures associées avec le changement climatique mondial. *Appl. Geogr.* 2017, 82, 83–92. [\[CrossRef\]](#)
62. O'Donnell, M.; Ignizio, D. Prédicteurs bioclimatiques pour soutenir les applications écologiques dans les États contigus des États-Unis. *Série de données de surveillance géol.* 2012, 691, 10.
63. Kiritani, K. Prédiction des impacts du réchauffement climatique sur la dynamique des populations et la répartition des arthropodes au Japon. *Popul. Ecol.* 2006, 48, 5–12. [\[CrossRef\]](#)
64. Musolin, DL Insectes dans un monde plus chaud : réponses écologiques, physiologiques et biologiques des véritables punaises (Heteroptera) au changement climatique. *Glob. Chang. Biol.* 2007, 13, 1565–1585. [\[CrossRef\]](#)
65. Gomi, T.; Nagasaka, M.; Fukuda, T.; Hagihara, H. Décalage du cycle biologique et des caractéristiques du cycle biologique de la chenille à tente d'automne par rapport à Changement climatique. *Entomol. Exp. Appl.* 2007, 125, 179–184. [\[CrossRef\]](#)
66. Walther, GR; Roques, A.; Hulme, P.-É.; Sykes, MT; Pyszek, P.; Kuhn, M.; Zobel, M.; Bacher, S.; Botta-Dukat, Z.; Bugmann, H.; et coll. Espèces exotiques dans un monde plus chaud : risques et opportunités. *Trends Ecol. Evol.* 2009, 24, 686–693. [\[CrossRef\]](#)
67. Robinet, C.; Roques, A. Impacts directs du réchauffement climatique récent sur les populations d'insectes. *Integr. Zool.* 2010, 5, 132–142. [\[CrossRef\]](#)
68. Moran, VC; Hoffmann, JH; Basson, NCJ Les effets des précipitations simulées sur les insectes cochenilles (Homoptera : Dactylopiidae) : composition des colonies et survie sur les cladodes de cactus. *Ecol. Entomol.* 1987, 12, 51–60. [\[CrossRef\]](#)
69. Kamata, N.; Igarashi, Y. Influence des précipitations sur le comportement alimentaire, la croissance et la mortalité des larves de la chenille du hêtre, *Quadralcarifera punctatella* (Motschulsky) (Lep., Notodontidae). *J. Appl. Entomol.* 1994, 118, 347–353. [\[CrossRef\]](#)
70. Ruf, C.; Fiedler, K. Survie des colonies de chenilles sociales sur le terrain : étude de cas de la petite teigne des œufs (Lepidoptera : Lasiocampidae). *J. Res. Lepid.* 1999, 38, 15–25. [\[CrossRef\]](#)
71. Beirne, BP Effets des précipitations sur les insectes des cultures. *Can. Entomol.* 1970, 102, 1360–1373. [\[CrossRef\]](#)
72. Vendramin, GG; Fady, B.; González-Martínez, SC; Hu, FS; Scotti, M.; Sébastiani, F.; Soto, Á.; Petit, RJ Génétiquement pauvre mais répandu : le cas d'un pin méditerranéen emblématique. *Evolution* 2008, 62, 680–688. [\[CrossRef\]](#)
73. Sofia, C.; Dos Santos, S.; Wilton De Vasconcelos, M. Identification des gènes différenciellement exprimés chez *Pinus pinaster* et *Pinus pinea* après infection par le nématode du pin. *Eur. J. Plant Pathol.* 2012, 132, 407–418. [\[CrossRef\]](#)
74. Mutke, S.; Vendramin, GG; Fady, B.; Bagnoli, F.; González-Martínez, SC Génétique moléculaire et quantitative du pin parasol (*Pinus pinea*). Dans *Diversité génétique des plantes horticoles*; Springer : Cham, Suisse, 2019; pp. 61–84. [\[CrossRef\]](#)
75. Altieri, MA Désert vert : les monocultures et leurs impacts sur la biodiversité. Dans *Red Sugar, Déserts verts : Rapport latino-américain sur les monocultures et les violations des droits humains à une alimentation et un logement adéquats, à l'eau, à la terre et au territoire*; FIAN International, FIAN Suède, HIC-AL et SAL : Stockholm, Suède, 2009; pp. 67–76.
76. Straub, CS; Simasek, NP; Dohm, R.; Gapinski, MR; Aikens, EO; Nagy, C. La diversité des plantes augmente les déplacements des herbivores et vulnérabilité à la prédation. *Basic Appl. Ecol.* 2014, 15, 50–58. [\[CrossRef\]](#)
77. Wright, A.J.; Maman, L.; Barry, K.; van Ruijven, J. Gradients de stress et biodiversité : la vulnérabilité de la monoculture entraîne une croissance plus forte Effets sur la biodiversité pendant les années de sécheresse. *Écologie* 2021, 102, e03193. [\[CrossRef\]](#)
78. Stefani, A. Les forêts de pins côtiers et la nouvelle loi forestière consolidée. Dans *I Georgofili, Cahiers : I. Les forêts de pins côtiers comme patrimoine culturel*; Polistampa : Florence, Italie, 2019; p. 53–57.
79. Caudullo, G.; Welk, E.; Jesús, S.-M.-A. Cartes chorologiques des principales espèces ligneuses européennes. *Data Br.* 2017, 12, 662–666. [\[CrossRef\]](#)
80. Tagarelli, N.; Avosani, S.; Tucci, M.; Verrastro, V. Premier signalement de *Toumeyella parvicornis* (Hemiptera : Coccidae) dans les Pouilles (Italie du Sud-Est). *OEPP Bull. Rév.* 2022, 52, 487–492. [\[Référence croisée\]](#)
81. Boselli, M.; Allez, N.; Mirotti, A.; Mazzini, F.; Mazzoni, F.; Mosti, M.; Foschi, S.; Scapini, C. *Crisococcus pini* (Homoptera, Pseudococcidae) en Emilie Romagne : Délimitation de la zone infestée et plan de contrôle. Dans *Actes des Journées Phytopathologiques ; Journées phytopathologiques* : Chianciano Terme, Italie, 2018; p. 8.
82. Bragard, J.; Di Serio, F.; Gonthier, P.; Jacques Miret, JA; Justesen, AF; Magnusson, CS; Milonas, P.; Navas-Cortés, JA; Parnell, S.; Potting, R.; et al. Catégorisation des ravageurs de *Crisococcus pini*. *EFSA J.* 2021, 19, e06928. [\[CrossRef\]](#)
83. OEPP. Disponible en ligne : <https://gd.eppo.int/reporting/article-7314> (consulté le 1er décembre 2022).
84. Cutini, A.; Chianucci, F.; Manetti, MC Relations allométriques pour le volume et la biomasse du pin parasol (*Pinus pinea* L.) dans les peuplements côtiers italiens. *Iforest —Biogeosci. For.* 2013, 6, 331. [\[CrossRef\]](#)
85. Camarda, I.; Laureti, P.; Angelini, P.; Capogrossi, R.; Carta, L.; Brunu, A. Le système de cartes naturelles de la Sardaigne ; Série Rep. ; ISPRA : Rome, Italie, 2015.

86. Gallego, D. ; Riba, JM; Molina, N. ; González, E. ; Di Sora, N. ; Nuñez, L. ; Clos, UN M; Comparini, C. ; Leza, M. Les invasions silencieuses des escolitidés : le cas du genre *Xylosandrus* (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae). *Foresterie* 2020, 78, 78-83.
87. Rabkin, FB; Lejeune, RR Quelques aspects de la biologie et de la dispersion de la cochenille du pin, *Toumeyella numismaticum* (Pettit et McDaniel) (Homoptera : Coccidae). *Can. Entomol.* 1954, 86, 570–575. [[CrossRef](#)]
88. Devy-Vareta, N. Recherches sur l'histoire forestière portugaise aux XIXe et XXe siècles : orientations et lacunes. *Hist. S'il te plaît* 1999, 18, 57–94.
89. Barranco Reyes, J. ; Ortuño Pérez, SF Approche du secteur des pignons de pin en Espagne. *Révérénd Spanish Estud. Agrosoc. Et la pêche.* 2004, 201, 165–189. [[CrossRef](#)]
90. Proença, VM; Pereira, HM; Guilherme, J. ; Vicente, L. Diversité des plantes et des oiseaux dans les forêts naturelles et dans les forêts indigènes et exotiques plantations dans le nord-ouest du Portugal. *Acta Oecol.* 2010, 36, 219–226. [[CrossRef](#)]
91. Lloret, F. ; Calvo, E. ; Pons, X. ; Díaz-Delgado, R. Feux de forêt et modèles paysagers dans l'est de la péninsule ibérique. *Paysage. Écol.* 2002, 17, 745–759. [[CrossRef](#)]
92. Pausas, JG; Blade, C. ; Valdécantos, A. ; Seva, JP; Fuentes, D. ; Alloza, JA; Vilagrosa, A. ; Bautista, S. ; Cortina, J. ; Vallejo, R. Pins et chênes dans la restauration des paysages méditerranéens d'Espagne : nouvelles perspectives pour une pratique ancienne - une revue. *Ecol végétale.* 2004, 171, 209-220. [[Référence croisée](#)]
93. Álvarez, G. ; Etxebeste, I. ; Gallego, D. ; David, G. ; Bonifacio, L. ; Jactel, H. ; Sousa, E. ; Pajares, JA Optimisation des pièges pour le direct Piégeage du nématode du pin vecteur *Monochamus galloprovincialis*. *J. Appl. Entomol.* 2015, 139, 618–626. [[CrossRef](#)]
94. De la Fuente, B.; Beck, PSA Les espèces envahissantes peuvent perturber les réseaux d'aires protégées : les enseignements du nématode du pin propagation au Portugal. *Forêts* 2018, 9, 282. [[CrossRef](#)]
95. Gallego, D.; Cánovas, F.; Esteve, MA; Galián, J. Biogéographie descriptive des espèces de *Tomicus* (Coleoptera : Scolytidae) en Espagne. *J. Biogeogr.* 2004, 31, 2011–2024. [[CrossRef](#)]
96. Gallego, D. ; Galián, J. ; Diez, JJ; Pajares, JA Réponses kairomonales de *Tomicus destruens* (Col., Scolytidae) à l'hôte de substances volatiles α -pinène et éthanol. *J. Appl. Entomol.* 2008, 132, 654–662. [[CrossRef](#)]
97. Choudhary, JS; Kumari, M.; Mali, SS; Dhakar, MK; Das, B.; Singh, AK Prédiction de l'impact des changements climatiques sur l'habitat adapté à la mouche de la goyave, *Bactrocera correcta* (Bezzi) à l'aide de la modélisation MaxEnt en Inde. *J. Agrometeorol.* 2019, 21, 24–30. [[CrossRef](#)]
98. Ji, W.; Han, K.; Lu, Y.; Wei, J. Prédiction de la distribution potentielle de la cochenille de la vigne, *Planococcus ficus*, dans le contexte du changement climatique MaxEnt. *Crop Prot.* 2020, 137, 105268. [[CrossRef](#)]

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles des auteurs et contributeurs individuels et non celles de MDPI et/ou des éditeurs. MDPI et/ou les éditeurs déclinent toute responsabilité pour toute blessure aux personnes ou aux biens résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.