



Organisation des Nations Unies
pour l'alimentation
et l'agriculture



Convention Internationale
pour la Protection
des Végétaux

Examen scientifique des effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux

**Un défi mondial à relever afin de
prévenir et d'atténuer les risques
phytosanitaires dans l'agriculture,
la sylviculture et les écosystèmes**





Examen scientifique des effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux

**Un défi mondial à relever afin de
prévenir et d'atténuer les risques
phytosanitaires dans l'agriculture,
la sylviculture et les écosystèmes**

Auteurs: Maria Lodovica Gullino (auteure principale, Italie),
Ramon Albajes (Espagne), Ibrahim Al-Jboory (Iraq),
Francislene Angelotti (Brésil), Subrata Chakraborty (Australie),
Karen A. Garrett (États-Unis d'Amérique), Brett Phillip Hurley
(Afrique du Sud), Peter Juroszek (Allemagne), Khaled Makkouk
(Liban), Xubin Pan (Chine) et Tannecia Stephenson (Jamaïque).

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
Rome, 2021

Citer comme suit:

Secrétariat de la CIPV. 2021. *Examen scientifique des effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux: un défi mondial à relever afin de prévenir et d'atténuer les risques phytosanitaires dans l'agriculture, la sylviculture et les écosystèmes.* Rome. FAO pour le compte du Secrétariat de la Convention internationale pour la protection des végétaux. <https://doi.org/10.4060/cb4769fr>

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. Le fait qu'une société ou qu'un produit manufacturé, breveté ou non, soit mentionné ne signifie pas que la FAO approuve ou recommande ladite société ou ledit produit de préférence à d'autres sociétés ou produits analogues qui ne sont pas cités.

Les opinions exprimées dans ce produit d'information sont celles du/des auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement les vues ou les politiques de la FAO.

ISBN 978-92-5-134500-9

© FAO, 2021



Certains droits réservés. Cette œuvre est mise à la disposition du public selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Partage dans les Mêmes Conditions 3.0 Organisations Intergouvernementales (CC BY NC SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/legalcode.fr>).

Selon les termes de cette licence, cette œuvre peut être copiée, diffusée et adaptée à des fins non commerciales, sous réserve que la source soit mentionnée. Lorsque l'œuvre est utilisée, rien ne doit laisser entendre que la FAO cautionne tels ou tels organisation, produit ou service. L'utilisation du logo de la FAO n'est pas autorisée. Si l'œuvre est adaptée, le produit de cette adaptation doit être diffusé sous la même licence Creative Commons ou sous une licence équivalente. Si l'œuvre est traduite, la traduction doit obligatoirement être accompagnée de la mention de la source ainsi que de la clause de non-responsabilité suivante: «La traduction n'a pas été réalisée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). La FAO n'est pas responsable du contenu ni de l'exactitude de la traduction. L'édition originale en anglais est celle qui fait foi.»

Tout litige relatif à la présente licence ne pouvant être résolu à l'amiable sera réglé par voie de médiation et d'arbitrage tel que décrit à l'Article 8 de la licence, sauf indication contraire contenue dans le présent document. Les règles de médiation applicables seront celles de l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (<http://www.wipo.int/amc/fr/mediation/rules>) et tout arbitrage sera mené conformément au Règlement d'arbitrage de la Commission des Nations Unies pour le droit commercial international (CNUDCI).





Matériel attribué à des tiers. Il incombe aux utilisateurs souhaitant réutiliser des informations ou autres éléments contenus dans cette œuvre qui y sont attribués à un tiers, tels que des tableaux, des figures ou des images, de déterminer si une autorisation est requise pour leur réutilisation et d'obtenir le cas échéant la permission de l'ayant-droit. Toute action qui serait engagée à la suite d'une utilisation non autorisée d'un élément de l'œuvre sur lequel une tierce partie détient des droits ne pourrait l'être qu'à l'encontre de l'utilisateur.

Ventes, droits et licences. Les produits d'information de la FAO sont disponibles sur le site web de la FAO (<http://www.fao.org/publications/fr>) et peuvent être obtenus sur demande adressée par courriel à: publications-sales@fao.org. Les demandes visant un usage commercial doivent être soumises à: www.fao.org/contact-us/licence-request. Les questions relatives aux droits et aux licences doivent être adressées à: copyright@fao.org.

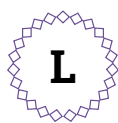
Le texte de ce document n'est pas une interprétation juridique officielle de la Convention Internationale pour la Protection des Végétaux (CIPV) ou de ses documents connexes, et est produit à des fins d'information publique uniquement. Pour traduire ce matériel, veuillez contacter ippc@fao.org pour plus d'informations sur un accord de coédition.

Photographies de couverture: ©Adobe stock/Kotangens

Table des matières

◆	Avant-propos	v
◆	Remerciements	vi
◆	Abréviations, sigles et acronymes	vii
◆	Résumé analytique	ix
	Introduction	1
	<i>Effets des changements climatiques sur l'agriculture, la sylviculture et les écosystèmes</i>	2
	<i>Organismes nuisibles qui affectent les cultures, la sylviculture et les écosystèmes à travers le monde</i>	8
	<i>Filières utilisées par les organismes nuisibles</i>	10
	<i>Approches utilisées pour étudier les effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux</i>	14
	Effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux	20
	<i>Simulation des futurs risques phytosanitaires</i>	21
	<i>Effets sur les espèces d'organismes nuisibles</i>	22
	<i>Études de cas sur certaines espèces d'organismes nuisibles</i>	24
	Prévention, atténuation et adaptation	36
	<i>Mesures préventives</i>	37
	<i>Dernières avancées technologiques</i>	40
	<i>Atténuation et adaptation</i>	43
	Conclusions et recommandations	45
	<i>Élaboration des politiques et réglementation</i>	46
	<i>Besoins en matière de recherche</i>	47
	<i>Coopération internationale</i>	49
	<i>Renforcement des capacités</i>	50
	Bibliographie	52

Avant-propos



Les changements climatiques constituent un défi sans précédent pour la biosphère et la communauté internationale, et une menace inédite pour la biodiversité de la planète, la santé humaine et l'économie mondiale. Ils représentent également un défi singulier pour la santé des végétaux. Les changements climatiques affecteront les écosystèmes et les systèmes de production agricole dans le monde entier. Ils auront un impact sur les flux commerciaux internationaux de produits agricoles, et influenceront également sur le pouvoir infectieux, la gravité et la répartition des organismes nuisibles à travers le monde. Les changements climatiques constitueront, en particulier, une épreuve hors du commun pour la communauté phytosanitaire mondiale et sa capacité à proposer des solutions efficaces et coordonnées fondées sur des données scientifiques.

L'Année internationale de la santé des végétaux (IYPH) 2020 a permis de sensibiliser l'opinion et les responsables politiques à la santé des végétaux et d'aider les pouvoirs publics et la communauté internationale à répondre aux défis phytosanitaires. Les effets des changements climatiques figurent parmi les grands défis à relever en matière phytosanitaire. C'est pourquoi le Comité directeur international de l'IYPH a commandé un examen scientifique sur cette question. Afin d'asseoir la crédibilité scientifique de l'examen, le Comité directeur a décidé de confier sa rédaction à des scientifiques de renom des quatre coins du monde, et a mis en place un rigoureux système d'examen par les pairs afin d'en valider les conclusions. Le présent rapport présente les résultats de l'examen. Sa préparation a été placée sous la direction de la professeure Maria Lodovica Gullino (Université de Turin, Italie) en tant qu'auteure principale, avec la contribution de dix coauteurs spécialistes en phytopathologie, entomologie, herbologie, climatologie et analyse de données issus de toutes les régions de la FAO. L'examen scientifique a été préparé sous les auspices du Secrétariat de la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV).

Avec cet examen scientifique sur les effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles et, par conséquent, sur la santé des végétaux, le Comité directeur international de l'IYPH entend fournir les bases scientifiques qui permettront aux instances phytosanitaires internationales de mener des débats fructueux concernant l'évaluation et la gestion des effets des changements climatiques. Le Comité directeur espère que cette étude amènera la Commission des mesures phytosanitaires de la CIPV à envisager et à élaborer des politiques internationales destinées à atténuer les effets des changements climatiques sur la santé des végétaux. Cette étude est considérée comme la première étape vers la concrétisation du volet «Évaluation et gestion des effets du changement climatique sur la santé des végétaux» figurant dans le Programme de développement du Cadre stratégique de la CIPV pour 2020-2030. Nous espérons sincèrement qu'elle incitera la communauté internationale à agir de façon résolue et coordonnée face aux défis phytosanitaires posés par les changements climatiques.

Ralf Lopian

Président du Comité directeur international de l'IYPH 2020



Remerciements

Maria Lodovica Gullino remercie le personnel des projets *Plant and Food Biosecurity* (PLANTFOODSEC, subvention n° 261752), *Effective Management of Pests and Harmful Alien Species - Integrated Solutions* (EMPHASIS, subvention n° 634179) et *EU-CHINA Lever for IPM Demonstration* (EUCLID, subvention n° 633999); et Ramon Albajes remercie lui aussi le personnel des projets EMPHASIS et EUCLID, tous financés par la Commission européenne. Peter Juroszek remercie le personnel du projet *Potential medium- and long-term effects of the projected climate change on plant diseases and on fungicide efficacy in field crops in Germany* (SIMKLIMA) dirigé par M. Benno Kleinhenz (subvention n° FKZ 281B202616) et financé par des fonds du Ministère fédéral de l'alimentation et de l'agriculture (BMEL) sur décision du Parlement de la République fédérale d'Allemagne via le Bureau fédéral pour l'agriculture et l'alimentation (BLE) dans le cadre de son programme de soutien à l'innovation. Xubin Pan exprime sa reconnaissance pour le soutien apporté par le Projet de conseil de l'Académie chinoise d'ingénierie (2019-ZD-4).

Les auteurs tiennent aussi à remercier Stefania Antro (Agroinnova, Université de Turin) pour son précieux appui technique spécialisé. Ils remercient également Viivi Kuvaja (Secrétariat de la CIPV, FAO) pour son aide et son soutien constants, ainsi que les réviseurs pour leurs précieuses suggestions tout au long du processus de rédaction.

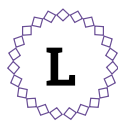
Le présent rapport a été préparé avec la contribution d'experts de la Division de la production végétale et de la protection des plantes, de la Division des forêts, de la Division des terres et des eaux et du Bureau du changement climatique, de la biodiversité et de l'environnement de la FAO.

Abréviations, sigles et acronymes

- ◆ **ADN** acide désoxyribonucléique
- ◆ **ARP** analyse du risque phytosanitaire
- ◆ **CGIAR** Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale
- ◆ **CIPV** Convention internationale pour la protection des végétaux
- ◆ **CLIMEX** Modélisation des événements climatiques extrêmes
- ◆ **covid-19** maladie à coronavirus 2019
- ◆ **FACE** Enrichissement en CO₂ à l'air libre
- ◆ **FAO** Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
- ◆ **GIEC** Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- ◆ **IYPH** Année internationale de la santé des végétaux
- ◆ **NIMP** Norme internationale pour les mesures phytosanitaires
- ◆ **ONPV** Organisation nationale de la protection des végétaux
- ◆ **TR4** Race tropicale 4 (de *Fusarium oxysporum*)

- ◆ **C₃** composé à trois atomes de carbone produit lors de la photosynthèse
- ◆ **C₄** composé à quatre atomes de carbone produit lors de la photosynthèse
- ◆ **CH₄** méthane
- ◆ **CO₂** dioxyde de carbone
- ◆ **N₂O** protoxyde d'azote

Résumé analytique



Les changements climatiques demeurent une menace pour la vie et les moyens d'existence des populations à travers le monde et accentuent les problèmes auxquels l'humanité est déjà confrontée. Le présent rapport a pour objet de décrire les effets potentiels des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux et, par conséquent, sur la santé des végétaux, en s'appuyant sur une analyse de la littérature et des études scientifiques consacrées à ces questions. Le terme «organisme nuisible aux végétaux», ci-après dénommé «organisme nuisible», désigne toute espèce, souche ou biotype de végétal, d'animal ou d'agent pathogène nuisible pour les végétaux ou produits végétaux. Aujourd'hui comme hier, plusieurs exemples d'apparition de foyers d'organismes nuisibles illustrent clairement l'ampleur des dégâts causés par ce phénomène. Le réchauffement climatique facilite l'introduction d'organismes indésirables. Par exemple, un hiver exceptionnellement doux peut suffire à favoriser l'établissement d'organismes nuisibles envahissants qui, en temps normal, ne pourraient s'établir dans une zone donnée. En fait, la mondialisation accrue des marchés ces dernières années, associée à la hausse des températures, a créé une situation particulièrement propice à la circulation et à l'établissement des organismes nuisibles, avec une augmentation concomitante du risque de graves répercussions sur les forêts et les cultures.

Plusieurs études ont cherché à évaluer les effets de divers facteurs atmosphériques et climatiques, comme l'augmentation de la température, du dioxyde de carbone et de l'ozone, ainsi que la modification des conditions hydriques ou d'humidité, sur la répartition, la présence et la densité des organismes nuisibles et sur la gravité du risque phytosanitaire qu'ils posent. La plupart des travaux ont porté sur les systèmes aménagés (cultures agricoles et horticoles, arbres forestiers, par exemple), tandis que les systèmes non aménagés ont été relativement négligés. Différentes approches de recherche ont été utilisées, allant de la conduite d'expériences en laboratoire et sur le terrain à la réalisation d'études de simulation des futurs risques phytosanitaires.

La plupart des études, menées sur des cultures céréalières et horticoles, indiquent que le risque phytosanitaire lié aux insectes, aux agents pathogènes et aux adventices augmentera globalement dans les écosystèmes agricoles touchés par les changements climatiques, notamment dans les zones actuellement les plus froides, comme les régions arctiques, boréales, tempérées et subtropicales. Cette prévision est aussi largement valable pour les agents pathogènes et les insectes nuisibles présents dans les forêts. S'agissant des systèmes non aménagés, seuls quelques résultats de travaux de recherche ont été publiés et aucune conclusion générale ne peut donc être tirée pour le moment.

Des mesures de prévention, d'atténuation et d'adaptation doivent être prises pour limiter la dissémination des organismes nuisibles à travers le monde causée par les voyages et les échanges commerciaux. Ces mesures comprennent par exemple l'utilisation de semences et de matériel végétal sains ou encore l'adoption d'innovations technologiques récentes comme les dernières techniques d'application des pesticides. Parmi les mesures d'atténuation et d'adaptation à court et moyen terme, on peut citer l'utilisation de variétés résistantes et la modification des microclimats.

Malgré l'abondance de travaux sur la biologie des changements climatiques, d'importantes lacunes subsistent en ce qui concerne la recherche sur les effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles et donc sur la santé des végétaux elle-même. Ces lacunes concernent notamment les effets des changements climatiques sur l'efficacité des stratégies de lutte, sur les organismes nuisibles souterrains ainsi que sur les systèmes forestiers et les systèmes non aménagés. Il convient d'adopter une approche pluridisciplinaire à long terme qui prenne en compte les problèmes rencontrés

aussi bien dans les pays en développement que dans les pays industrialisés. Il convient également de promouvoir la coopération internationale et d'investir dans le renforcement des capacités, afin de mettre en place des systèmes solides d'analyse, de surveillance et de suivi du risque phytosanitaire.

En résumé, les éléments examinés dans le présent rapport indiquent clairement que les changements climatiques entraîneront dans bien des cas une aggravation des problèmes phytosanitaires dans les écosystèmes aménagés (agriculture, horticulture, sylviculture, etc.), semi-aménagés (parcs nationaux, etc.), mais aussi probablement dans les écosystèmes non aménagés. Les changements climatiques récents obligent déjà à modifier les protocoles de protection des végétaux. Et de nouveaux ajustements deviendront encore plus indispensables à l'avenir, si les modélisations des changements climatiques réalisées jusqu'à présent devaient se confirmer. Face aux changements climatiques, il est primordial de préserver les services et les produits des écosystèmes aménagés et non aménagés, notamment les denrées alimentaires. Les mesures phytosanitaires préventives et curatives constituent l'un des principaux moyens d'assurer et de préserver la sécurité alimentaire aujourd'hui et à l'avenir.

Opération de lutte contre le criquet pèlerin dans la Corne de l'Afrique



©FAO/Louis Tato

Introduction





Effets des changements climatiques sur l'agriculture, la sylviculture et les écosystèmes

Le présent examen a pour objet d'évaluer les effets potentiels des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux et, par conséquent, sur la santé des végétaux. Le terme «organisme nuisible aux végétaux», ci-après dénommé «organisme nuisible», désigne toute espèce, souche ou biotype de végétal, d'animal ou d'agent pathogène nuisible pour les végétaux ou produits végétaux, selon la définition qui en est donnée dans la norme internationale pour les mesures phytosanitaires n° 5 (NIMP n° 5) adoptée par la Commission des mesures phytosanitaires de la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV).

On entend par «changements climatiques» la hausse moyenne de la température de l'air en surface et de la température à la surface des océans combinées, sur l'ensemble du globe et au cours d'une période de 30 ans. Le réchauffement est calculé par rapport à la période 1850-1900, qui sert d'approximation des températures préindustrielles. Le réchauffement survenu entre la période préindustrielle et la période 2006-2015 est estimé à 0,87 °C. L'ampleur du réchauffement d'origine humaine depuis 2000 serait égale à l'ampleur du réchauffement observée depuis la même date, avec une fourchette probable de ± 20 pour cent due à l'incertitude entourant l'apport de l'activité solaire et volcanique pendant la période historique (GIEC, 2018). Selon les projections des modèles climatiques, les caractéristiques climatiques régionales devraient présenter des différences robustes entre le moment présent et celui où le réchauffement planétaire atteindra 1,5 °C, et entre 1,5 °C et 2 °C. Ces différences consistent notamment dans l'augmentation de la température moyenne dans la plupart des régions continentales et océaniques, des extrêmes de chaleur dans la plupart des zones habitées, des épisodes de fortes précipitations dans plusieurs régions et de la probabilité de sécheresses et de déficits de précipitations dans certaines régions (GIEC, 2018).

Les changements climatiques demeurent une menace pour la vie et les moyens d'existence des populations à travers le monde (Altizer *et al.*, 2013; GIEC, 2018). Les changements observés sont les suivants: élévation des températures des terres émergées et des océans à l'échelle mondiale (figure 1), disparition des calottes glaciaires et du manteau neigeux, élévation du niveau des mers, accroissement de l'acidification des océans, augmentation de la fréquence des extrêmes de chaleur, variabilité accrue des régimes de précipitations et hausse de la fréquence des épisodes de fortes précipitations et de sécheresse (figure 2). Ces changements ont été attribués à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre anthropiques depuis l'ère préindustrielle, en raison de l'intensification des activités agricoles et industrielles, de la combustion de combustibles fossiles et des transformations touchant l'utilisation des terres (figures 3 et 4). L'analyse chimique de la glace et des sédiments révèle que les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4) et de protoxyde d'azote (N_2O) ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis au moins 800 000 ans.

Les effets de ces concentrations, conjugués à ceux d'autres facteurs anthropiques comme la déforestation, sont la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX^e siècle (GIEC, 2014a, 2014b, 2018; Wuebbles et Hayhoe, 2002). Il importe de souligner que les changements climatiques, notamment le réchauffement de la planète, vont probablement se poursuivre. Selon le Rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sur le réchauffement planétaire

de 1,5 °C, il est probable que le réchauffement planétaire atteindra 1,5 °C entre 2030 et 2052 par rapport aux niveaux préindustriels s'il continue d'augmenter au rythme actuel (GIEC, 2018)¹. Les risques liés au climat sont plus élevés avec un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux risques actuels², mais les risques seront nettement plus graves si le réchauffement atteint 2 °C. Ces risques sont fonction de l'ampleur et du rythme du réchauffement, de la région considérée, des niveaux de développement et de vulnérabilité aux échelons régional et local, ainsi que des mesures d'adaptation et d'atténuation mises en œuvre (GIEC, 2018).

Les effets des changements climatiques se font déjà ressentir sur les systèmes naturels et humains, notamment des modifications de la quantité et de la qualité de l'eau, ainsi qu'une évolution de l'aire de répartition, des activités saisonnières, des mouvements migratoires, de l'abondance et des interactions interspécifiques chez beaucoup d'espèces terrestres, dulçaquicoles et marines (GIEC, 2014a, 2019a, 2019b), avec des effets davantage négatifs que positifs sur les rendements de la plupart des cultures (Porter *et al.*, 2019). Il a été démontré que les changements climatiques affectent les systèmes biologiques à différents niveaux, depuis les gènes jusqu'aux écosystèmes (Garrett *et al.*, 2006; Sutherst *et al.*, 2011). D'après Scheffers *et al.* (2016), les changements climatiques anthropiques ont altéré 82 pour cent des 94 processus écologiques fondamentaux identifiés par les biologistes, allant de la diversité génétique à la fonction des écosystèmes.

En outre, les risques déjà présents, comme la diminution de la disponibilité d'eau douce, seront amplifiés, et de nouveaux risques apparaîtront au cours du XXI^e siècle et au-delà. Les impacts futurs comporteront un risque accru d'extinction des espèces. Par exemple, la plupart des espèces végétales n'ont pas la capacité naturelle de modifier leur aire de répartition suffisamment vite pour pouvoir suivre le rythme des changements climatiques, et les organismes marins seront exposés à une baisse de la concentration d'oxygène et à un accroissement de l'acidification, auxquels ils ne pourront peut-être pas s'adapter. En outre, les changements climatiques peuvent menacer la sécurité alimentaire en raison de leurs répercussions sur les cultures vivrières et les aliments d'origine végétale consommés par les animaux d'élevage. S'agissant du blé, du riz et du maïs, les conséquences les plus graves sont anticipées dans les régions tropicales et subtropicales. D'après les projections, les changements climatiques devraient avoir un impact négatif sur la production si la température augmente localement de 2 °C ou plus par rapport aux niveaux de la fin du XX^e siècle, même si ces changements pourraient avoir des effets bénéfiques en certains points du globe, notamment sous les latitudes élevées et en altitude. La production mondiale de denrées alimentaires et de fibres ainsi que la biosécurité des végétaux, qui comprennent l'ensemble des stratégies visant à évaluer et à gérer les risques posés par les maladies infectieuses, les organismes de quarantaine, les espèces exotiques envahissantes et les organismes vivants modifiés présents dans les écosystèmes naturels et aménagés, seront également affectées (Gregory *et al.*, 2009; Stack, Fletcher et Gullino, 2013).

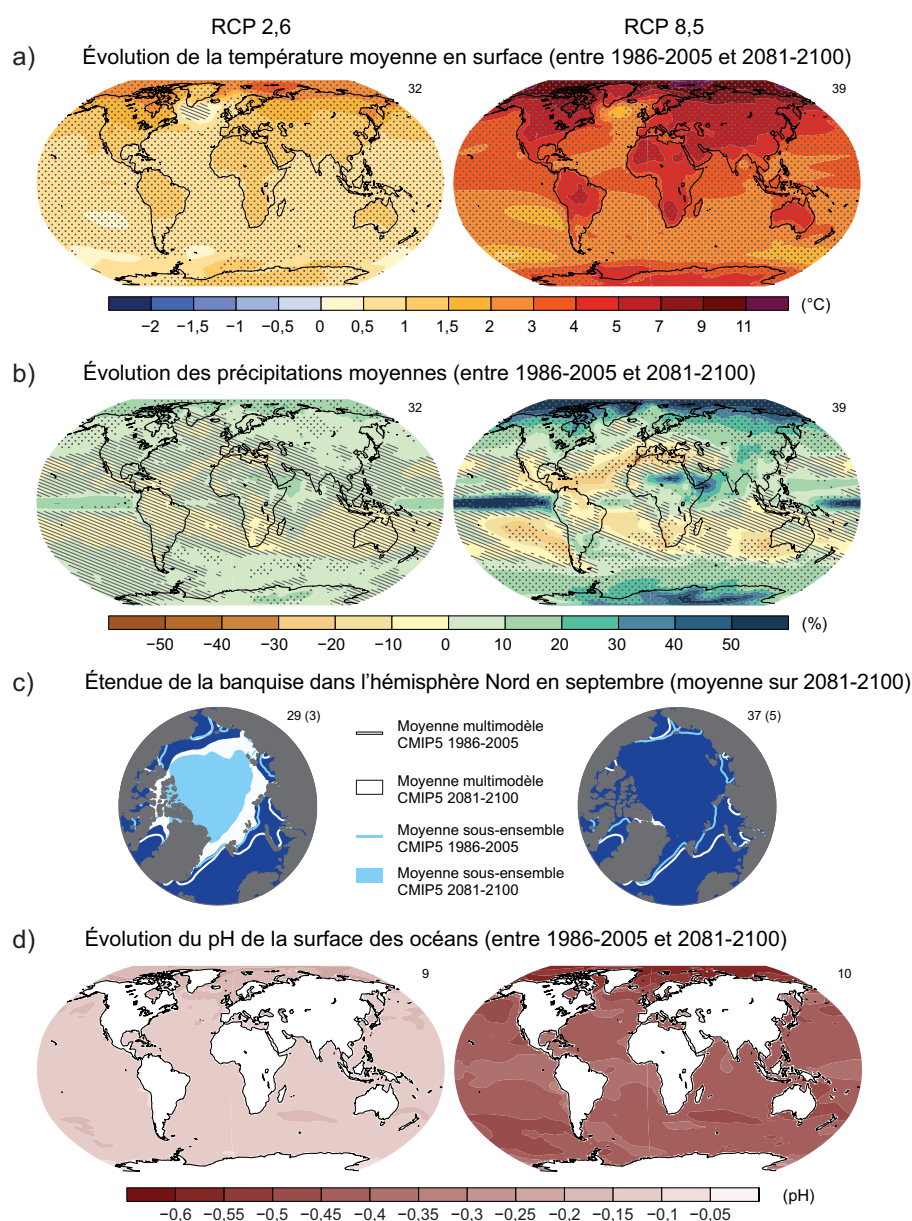
Le présent rapport vise à fournir des informations sur: i) les évolutions survenues au cours des dernières décennies; ii) les évolutions attendues au cours des prochaines décennies compte tenu des changements climatiques; et iii) les mesures qui peuvent être prises pour atténuer les effets des changements climatiques et s'y adapter aux niveaux local, régional et mondial.

Le but du rapport n'est pas d'examiner les causes des changements climatiques ni de fournir un résumé complet de l'ensemble des travaux publiés ces 30 dernières années. En revanche, le rapport renvoie à de nombreuses publications auxquelles le lecteur pourra se référer s'il souhaite approfondir telle ou telle question.

1 L'objectif de l'Accord de Paris (2015) est de limiter le réchauffement planétaire à un niveau nettement inférieur à 2 °C, de préférence à 1,5 °C, par rapport aux niveaux préindustriels.

2 D'après le Rapport spécial du GIEC sur le réchauffement planétaire de 1,5 °C (GIEC, 2018), les activités humaines ont déjà provoqué un réchauffement planétaire d'environ 1 °C au-dessus des niveaux préindustriels.

Figure 1



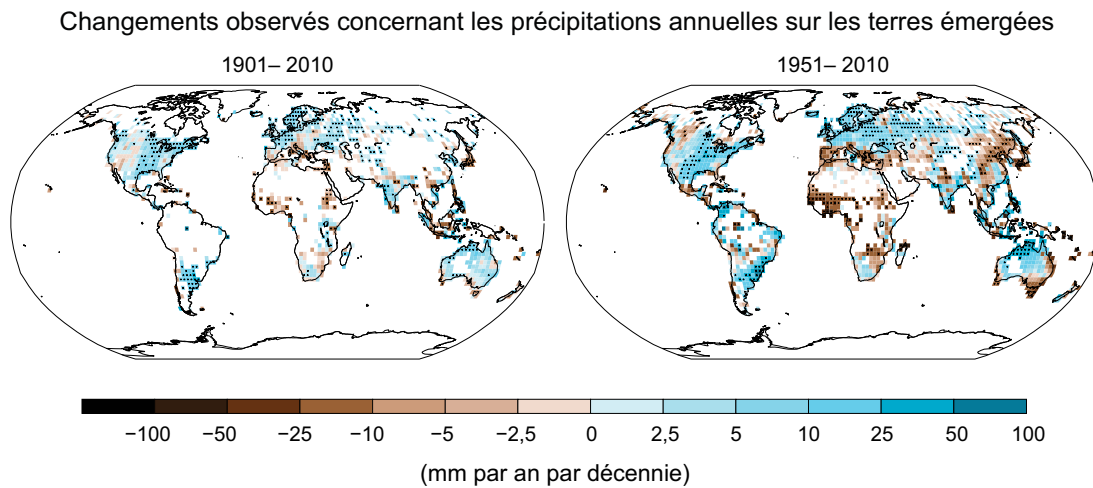
Source: GIEC (2013).

Le texte original de l'analyse complète de la figure 1 publiée dans le rapport du GIEC 2013 est le suivant:

Figure RID.8 | Cartes des moyennes multimodèles CMIP5 pour les scénarios RCP2,6 et RCP8,5 sur la période 2081-2100 pour: a) l'évolution de la température moyenne annuelle en surface, b) l'évolution moyenne en pourcentage des précipitations moyennes annuelles, c) l'étendue de la banquise dans l'hémisphère Nord en septembre et d) l'évolution du pH de la surface des océans. Les changements indiqués dans les cartes a), b) et d) sont relatifs à la période 1986-2005. Le nombre de modèles CMIP5 utilisés pour calculer la moyenne multimodèle figure dans l'angle supérieur droit de chaque image. Pour les cartes a) et b), les hachures signalent les régions dans lesquelles la moyenne multimodèle est faible par rapport à la variabilité naturelle interne (c'est-à-dire inférieure à un écart type de la variabilité naturelle interne sur des moyennes de 20 ans). Les pointillés signalent les régions dans lesquelles la moyenne multimodèle est grande par rapport à la variabilité naturelle interne (c'est-à-dire supérieure à deux écarts types sur des moyennes de 20 ans) et dans lesquelles 90 % au moins des modèles s'accordent sur le signe du changement (voir encadré 12). Dans les cartes c), les lignes représentent les moyennes modélisées pour la période 1986-2005; les zones remplies concernent la fin du siècle. La moyenne multimodèle CMIP5 est indiquée en blanc, tandis que la moyenne projetée de l'étendue de banquise du sous-ensemble des modèles (dont le nombre figure entre parenthèses) qui reproduisent le plus fidèlement la moyenne climatologique et l'évolution de la banquise arctique sur la période 1979-2012 est indiquée en bleu clair. Pour obtenir davantage de détails techniques, voir les annexes du Résumé technique. [Figures 6.28, 12.1 1, 12.22 et 12.29; figures RT.15, RT.16, RT.17 et RT.20]

Pour de plus amples informations, se reporter à la source originale (rapport du GIEC, 2013). Le texte ci-contre a été reproduit avec l'aimable autorisation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Figure 2



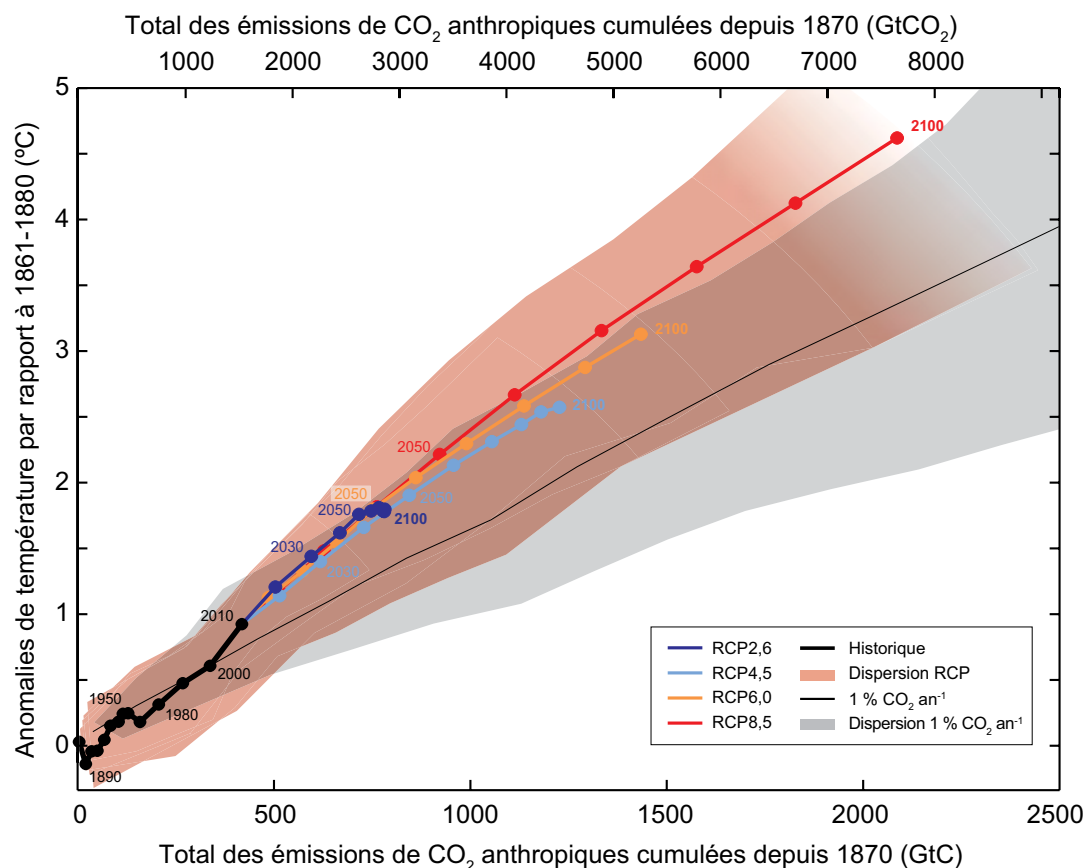
Source: GIEC (2013).

Le texte original de l'analyse complète de la figure 1 publiée dans le rapport du GIEC 2013 est le suivant:

Figure RID.2 | Cartes des changements observés de précipitations entre 1901 et 2010, et entre 1951 et 2010 (tendances calculées en utilisant les mêmes critères que pour la figure RID.1) à partir d'un ensemble de données. Pour obtenir davantage de détails techniques, voir les annexes du Résumé technique. {Résumé technique, Axe thématique 1, figure 2; figure 2.29}

Pour de plus amples informations, se reporter à la source originale (rapport du GIEC, 2013). Le texte ci-contre a été reproduit avec l'aimable autorisation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Figure 3



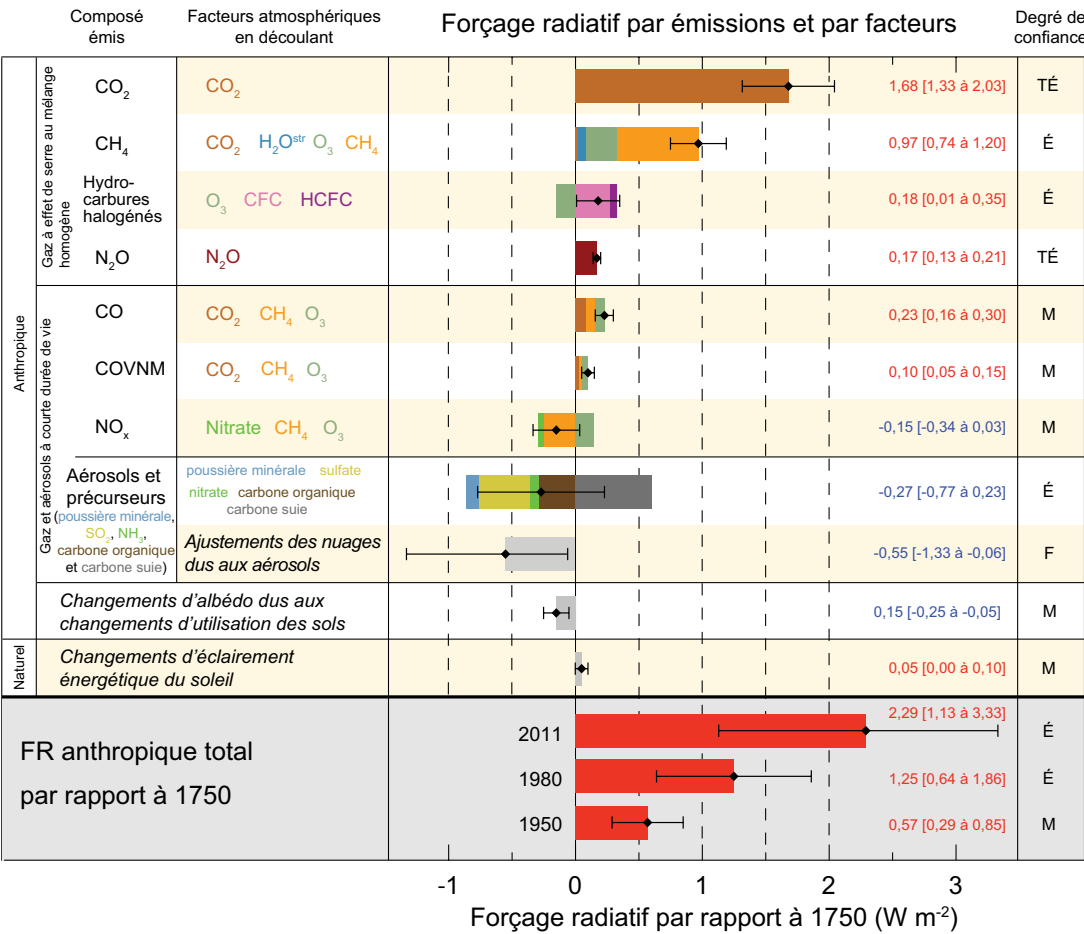
Source: GIEC (2013).

Le texte original de l'analyse complète de la figure 3 publiée dans le rapport du GIEC 2013 est le suivant:

Figure RID.10 | Augmentation de la température moyenne à la surface du globe en fonction du total des émissions de CO₂ cumulées dans le monde à partir de plusieurs sources de données. Les résultats de différents modèles de climat et cycle du carbone pour chaque scénario RCP jusqu'en 2100 sont représentés par des lignes de couleur et des moyennes décennales (points). Certaines moyennes décennales sont identifiées par souci de clarté (ex.: 2050 indiquant la décennie 2040-2049). Les résultats de modèles sur la période historique (1860-2010) sont indiqués en noir. La zone en couleur représente la dispersion des différents modèles pour les quatre scénarios RCP et s'estompe à mesure que le nombre de modèles disponibles diminue pour RCP8,5. La moyenne et la plage multimodèles simulées par les modèles CMIP5, forcés par une augmentation du CO₂ de 1 % par an (simulations pour 1 % CO₂ an⁻¹), sont indiquées par la fine ligne noire et la zone en gris. Pour un niveau spécifique d'émissions cumulées, les simulations d'augmentation du CO₂ de 1 % par an suggèrent un réchauffement inférieur à celles forcées par les scénarios RCP, car ces dernières incluent des forçages additionnels autres que le CO₂. Les valeurs de la température sont données par rapport à la période de référence 1861-1880 et les émissions, par rapport à 1870. Les moyennes décennales sont reliées par des lignes droites. Pour obtenir davantage de détails techniques, voir les annexes du Résumé technique. [Figure 12.45; Résumé technique, Axe thématique 8, figure 1]

Pour de plus amples informations, se reporter à la source originale (GIEC, 2013). Le texte ci-contre a été reproduit avec l'aimable autorisation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Figure 4



Source: GIEC (2013).

Le texte original de l'analyse complète de la figure 3 publiée dans le rapport du GIEC 2013 est le suivant:

Figure RID.5 | Estimations du forçage radiatif en 2011 par rapport à 1750 et incertitudes agrégées associées concernant les principaux facteurs du changement climatique. Les valeurs sont des moyennes du forçage radiatif global (FR¹⁴), réparties selon les composés émis ou les processus qui aboutissent à une combinaison de facteurs. Les meilleures estimations du forçage radiatif net sont présentées sous la forme d'un losange noir avec les intervalles d'incertitude correspondants; les valeurs numériques sont fournies sur la droite de la figure de même que le degré de confiance (TÉ – très élevé, É – élevé, M – moyen, F – faible, TF – très faible). Le FR des carbonés suies inclut le forçage de l'albédo induit par la présence de carbone suie sur la neige ou la glace. Les faibles forçages dus aux traînées de condensation (0,05 W m⁻², incluant les cirrus produits par ces traînées) aux HFC, aux PFC et aux SF6 (total 0,03 W m⁻²) ne sont pas présentés. Il est possible d'obtenir les FR des gaz basés sur leurs concentrations en faisant la somme des bandes de même couleur. Le forçage des volcans n'est pas inclus en raison de sa nature épisodique qui rend difficile sa comparaison aux autres mécanismes de forçage. Le forçage radiatif anthropique total est indiqué pour trois années différentes par rapport à 1750. Pour obtenir davantage de détails techniques, y compris les intervalles d'incertitude associés aux différentes composantes et aux différents processus, voir les annexes du Résumé technique. {8.5; figures 8.14 à 8.18; figures RT.6 et RT.7}

Pour de plus amples informations, se reporter à la source originale (GIEC, 2013). Le texte ci-contre a été reproduit avec l'aimable autorisation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Organismes nuisibles qui affectent les cultures, la sylviculture et les écosystèmes à travers le monde

Depuis leur domestication, il y a environ 10 000 ans, les cultures ont toujours été menacées par une multitude d'organismes nuisibles provoquant des pertes de rendement et, dans de nombreux cas, des épisodes de famine et des troubles sociaux. Les organismes nuisibles détruisent en moyenne entre 10 et 28 pour cent de la production végétale à travers le monde (Savary *et al.*, 2019). Il existe aussi des pertes post-récolte, dont les pays en développement sont les premiers à en pâtir. Outre les pertes, la présence de mycotoxines (toxines produites par des champignons) dans les denrées alimentaires et les aliments pour animaux d'élevage constitue potentiellement une grave menace pour la santé humaine et animale (Magan, Medina et Aldred, 2011; Van Der Fels-Klerx, Liu et Battilani, 2016).

Aujourd'hui comme hier, plusieurs exemples d'apparition de foyers d'organismes nuisibles illustrent clairement l'ampleur des dégâts causés par ce type de phénomène.

On trouve dans l'histoire deux exemples emblématiques d'insectes nuisibles envahissants ayant provoqué des dégâts économiques et sociaux. Le premier est l'insecte phylloxéra (*Daktulosphaira vitifoliae*), qui a envahi et détruit les vignobles européens dans la seconde moitié du XIX^e siècle, et le second est le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*), qui a rapidement colonisé les parcelles de pommes de terre au XX^e siècle. Ces deux organismes nuisibles sont originaires des États-Unis d'Amérique. Plus récemment, plusieurs espèces d'insectes endémiques d'Amérique du Nord, qui n'avaient jamais donné lieu à de graves infestations, sont devenues des organismes nuisibles dévastateurs pour les ressources forestières en raison de changements dans la dynamique de leurs populations. Il s'agit notamment de la mineuse du tremble (*Phyllocnistis populiella*), de la mineuse du saule (*Micrurapteryx salicifoliella*) et de *Nepytia janetae*, qui ont décimé des millions d'hectares de forêts de trembles, de saules et de sapins épicéas depuis le début des années 1990 (Bebber, Ramotowski et Gurr, 2013). D'autres espèces endémiques sont elles aussi devenues des organismes nuisibles, notamment le dendroctone méridional du pin et le dendroctone du pin argenté (*Dendroctonus ponderosae* et *Dendroctonus frontalis*, respectivement) ainsi que le dendroctone rouge du pin (*Dendroctonus rufipennis*), qui ont récemment étendu leurs aires de répartition et infesté des pins et des épicéas, des arbres qui revêtent une importance sur le plan commercial (Anderegg, Kane et Anderegg, 2013; Bebbier, Ramotowski et Gurr, 2013).

Parmi les exemples emblématiques de dommages causés par les maladies des cultures et des forêts figurent la famine irlandaise, causée par *Phytophthora infestans* dans les années 1840, l'impact dévastateur de la rouille du caféier à Ceylan, causée par *Hemileia vastatrix* dans les années 1860, et la grande famine du Bengale en 1943, causée par *Helminthosporium oryzae* (Schumann, 1991). Un autre exemple significatif qui mérite d'être rappelé est le chancre du châtaignier, causé par *Cryphonectria parasitica*, qui a anéanti le châtaignier d'Amérique (*Castanea dentata*). Cette maladie a entraîné la mort de 80 pour cent des châtaigniers dans les années 1950 (Schumann, 1991) et a gravement endommagé les paysages dans l'ensemble du pays. Et d'autres menaces ont fait leur apparition: de nouvelles souches plus virulentes de la rouille noire du blé (*Puccinia graminis*) (Saunders, Pretorius et Hovmøller, 2019) et de la rouille jaune du blé (*Puccinia striiformis*) se propagent actuellement (Liu *et al.*, 2017) et une nouvelle souche invasive de *Phytophthora infestans* a rapidement déplacé d'autres génotypes de mildiou (Cooke *et al.*, 2012). Le flétrissement soudain de l'olivier, causé par *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*, qui a détruit des millions d'oliviers dans les Pouilles (Italie) et menace également d'autres pays européens et méditerranéens, montre à quel point un agent pathogène peut endommager une culture et le paysage d'une région (Schneider *et al.*, 2020; Sicard *et al.*, 2018).

En Californie et en Oregon (États-Unis d'Amérique), ainsi que dans d'autres régions, *Phytophthora ramorum*, qui provoque la mort subite du chêne, constitue une menace pour les écosystèmes forestiers (Rizzo, Garbelotto et Hansen, 2005), tandis que d'autres espèces de *Phytophthora*, telles que *P. kernoviae* et *P. agathidicida*, affectent le kauri, un arbre emblématique de la Nouvelle-Zélande, où il revêt une grande importance culturelle (Scott et Williams, 2014), et que *P. pinifolia* endommage les forêts de pins au Chili (Duran *et al.*, 2008).

Outre les insectes et les agents pathogènes nuisibles aux végétaux, les nématodes peuvent eux aussi causer des dommages importants aux végétaux. D'après Williamson et Gleason (2003), les nématodes figurent parmi les organismes les plus répandus dans le monde et affectent tous les écosystèmes. La plupart d'entre eux n'ont aucun effet parasite et sont inoffensifs pour les végétaux. Ils consomment par exemple des micro-organismes comme des bactéries, mais un petit nombre d'espèces de nématodes sont des parasites obligatoires des végétaux, et certains de ces nématodes phytoparasites peuvent constituer une menace sérieuse pour les écosystèmes aménagés et non aménagés. Dans l'agriculture, les groupes de nématodes les plus problématiques sur le plan économique sont les endoparasites sédentaires, notamment les genres *Heterodera* et *Globodera* (nématodes à kyste) et *Meloidogyne* (nématode des racines). Dans le secteur de la sylviculture, la maladie du dépérissement du pin, causée par le nématode du pin (*Bursaphelenchus xylophilus*), est l'une des maladies invasives les plus dévastatrices pour les pins (*Pinus* spp.) et a des répercussions importantes sur les écosystèmes naturels en Afrique, en Amérique du Nord, en Asie et en Europe (CABI, 2021a). Elle est particulièrement dévastatrice en Asie orientale, notamment en Chine, au Japon et en République de Corée (Ikegami et Jenkins, 2018).

Enfin, certaines espèces végétales sont elles-mêmes des organismes nuisibles. Par exemple, les adventices sont considérées comme des «végétaux indésirables» dans l'agriculture, l'horticulture, la sylviculture et les écosystèmes non aménagés (Juroszek et von Tiedemann, 2013a; Korres *et al.*, 2016; Wan et Wang, 2019). Une adventice est donc une plante qui pousse au mauvais endroit ou au mauvais moment. Néanmoins, les adventices possèdent toute une série de propriétés qui peuvent être bénéfiques. Certaines espèces peuvent fournir des services écosystémiques utiles, en servant par exemple de nourriture pour les pollinisateurs comme les abeilles, en fournissant un habitat à de nombreux organismes utiles et en assurant un couvert végétal, ce qui permet de réduire l'érosion des sols. Elles peuvent également jouer un rôle de colonisateurs primaires à la suite de dommages causés à un sol ou à un écosystème (incendie ou glissement de terrain, par exemple) et contribuer à la stabilisation des berges et des dunes de sable. En outre, certaines sont utilisées dans la médecine traditionnelle. Néanmoins, les adventices peuvent provoquer des dermatites de contact ou des allergies à cause de leur pollen, et elles peuvent être toxiques pour le bétail (Ziska, Epstein et Schlesinger, 2009). Elles peuvent également avoir un impact négatif dans les endroits où elles apparaissent. De nombreuses adventices possèdent une vaste tolérance environnementale et un niveau élevé de plasticité phénotypique et de potentiel évolutif (Clements et DiTommaso, 2011), ce qui leur confère une capacité concurrentielle très élevée par rapport aux plantes cultivées, qui ont été sélectionnées pour être homogènes. Les adventices peuvent donc causer de lourdes pertes du point de vue de la qualité et de la quantité des cultures, mais aussi endommager gravement d'autres végétaux et habitats, car elles entrent en concurrence pour bénéficier des ressources souterraines (eau et nutriments, par exemple) et aériennes (lumière, par exemple) (Karkanis *et al.*, 2018; Naidu, 2015; Peters, Breitsameter et Gerowitt, 2014; Ramesh *et al.*, 2017). Par exemple, il est impossible de cultiver des carottes (*Daucus carota*), même dans un potager, sans agir contre les adventices, en raison de la faible capacité concurrentielle des plantules de carottes.

Filières utilisées par les organismes nuisibles

La dissémination des organismes nuisibles résulte de processus aussi bien naturels qu'anthropiques. Ce phénomène s'est considérablement amplifié au cours des dernières décennies avec la mondialisation des marchés des végétaux et produits végétaux, notamment les denrées alimentaires, le matériel végétal et le bois. Les voyages internationaux et le commerce des produits agricoles ont déplacé les cultures, les adventices, les agents pathogènes et les insectes nuisibles depuis leur environnement d'origine vers de nouvelles zones. Les cultures nouvellement introduites peuvent élargir la répartition des organismes nuisibles, et l'introduction d'organismes nuisibles dans un écosystème où ils étaient complètement absents auparavant peut causer des dommages extrêmement graves, car les organismes nuisibles et leurs hôtes peuvent ne pas avoir évolué ensemble. Ce phénomène de coévolution a été particulièrement observé chez les végétaux et leurs organismes nuisibles (Woolhouse *et al.*, 2002) et permet de créer un équilibre entre les hôtes et les organismes nuisibles au sein de leurs écosystèmes endémiques. Par exemple, le nématode du pin (voir l'étude de cas plus bas), qui a coévolué avec l'espèce végétale hôte dans sa zone d'origine, l'Amérique du Nord, ne cause pas de graves dommages dans la zone en question. En revanche, lorsqu'il a été introduit en Asie, le nématode du pin a tué plusieurs millions d'arbres de diverses espèces de *Pinus*.

D'après Anderson *et al.* (2004), la moitié des nouvelles phytopathologies sont disséminées par les voyages et les échanges internationaux, tandis que la dissémination naturelle, favorisée par les phénomènes météorologiques, constitue le deuxième facteur le plus important. En outre, il est probable que les conditions climatiques ou météorologiques aient une incidence sur l'établissement des organismes nuisibles. Par exemple, le réchauffement climatique peut faciliter l'établissement de certains organismes nuisibles qui, en temps normal, ne pourraient s'établir dans une zone donnée (pendant un hiver exceptionnellement doux dans des régions tempérées, par exemple). En fait, la mondialisation accrue des marchés ces dernières années, associée à la hausse des températures, a créé une situation particulièrement propice à la circulation et à l'établissement des organismes nuisibles, avec une augmentation concomitante du risque de graves pertes de rendement des cultures (Deutsch *et al.*, 2018; Savary *et al.*, 2019). Par conséquent, lorsqu'on étudie les effets potentiels des changements climatiques sur la santé des végétaux, et donc sur leur répartition, il importe d'identifier non seulement les facteurs qui permettent aux organismes nuisibles de se développer, mais aussi les filières qui leur permettent de se déplacer d'un endroit à l'autre.

Il convient également de cerner les caractéristiques des filières afin de définir les mesures à mettre en œuvre pour atténuer l'évolution du risque phytosanitaire induit par les changements climatiques et s'y adapter. Des efforts considérables ont été déployés aux niveaux national et international en vue de réduire le risque de déplacement des organismes nuisibles à l'échelle internationale (Meurisse *et al.*, 2019), notamment avec la publication et la mise en œuvre des normes internationales pour les mesures phytosanitaires (NIMP), élaborées sous les auspices de la Commission des mesures phytosanitaires et du Secrétariat de la CIPV. Ces normes fournissent notamment des directives sur la manière de mener une analyse du risque phytosanitaire (ARP) en vue d'évaluer le risque d'introduction (entrée et établissement) et de dissémination d'organismes nuisibles et de déterminer les mesures à mettre en œuvre pour éviter une telle situation (NIMP n° 2, 2019; NIMP n° 11, 2019; NIMP n° 21, 2019). Ces mesures phytosanitaires sont généralement appliquées en fonction des risques propres à la filière. La NIMP n° 11 (2019) précise que les informations à l'appui de l'analyse du risque phytosanitaire doivent être réexaminées périodiquement. Ce réexamen comprend vraisemblablement une réévaluation des risques liés aux filières, ou du moins de ceux fortement liés à l'évolution des conditions climatiques, comme la survenue de phénomènes météorologiques extrêmes susceptibles de déplacer des organismes de quarantaine sur de longues distances.

On trouvera ci-après une présentation des principaux types de filières.

Matériaux d'emballage en bois

Le bois, y compris celui utilisé pour l'emballage, a toujours été un vecteur important de dissémination des organismes nuisibles aux végétaux. Parmi illustrer l'importance de cette filière, on peut citer par exemple le déplacement d'espèces d'insectes envahissants comme le longicorne asiatique *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) via les emballages utilisés dans le commerce international (OEPP, 2020a, 2021a). Cette espèce est polyphage (c'est-à-dire qu'elle se nourrit d'un large éventail d'aliments) et puise donc sa nourriture dans plusieurs espèces arboricoles comme l'érable (*Acer*), le peuplier et le tremble (*Populus*), le saule (*Salix*) et l'orme (*Ulmus*), aussi bien en forêt qu'en milieu urbain. Originaire de Chine et de la République de Corée, le longicorne asiatique a été introduit aux États-Unis d'Amérique et au Canada via des emballages en bois infestés, et il a également été détecté dans plusieurs pays européens. Des programmes d'éradication basés sur la détection, l'enlèvement et la destruction des arbres infestés sont actuellement menés dans ces pays. L'inspection et le traitement minutieux des matériaux d'emballage en bois massif, comme les palettes et le bois de calage, constituent une exigence internationale visant à empêcher de nouvelles introductions. Les modélisations réalisées en vue d'anticiper la répartition géographique du coléoptère montrent que les changements climatiques pourraient modifier sa répartition et son impact (Hu *et al.*, 2009).

Les emballages en bois ont également été identifiés comme étant une probable filière pour de nombreuses espèces de scolytes, comme *Ips grandicollis* (Coleoptera: Curculionidae), et d'autres ravageurs forestiers extrêmement nuisibles, comme l'agrite du frêne, *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) et la guêpe perce-bois, *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae) (Meurisse *et al.*, 2019). Le déplacement du nématode du pin, *B. xylophilus* (voir l'étude de cas plus bas), ou de son insecte vecteur, via les matériaux d'emballage en bois non traités a également été observé (Sousa *et al.*, 2011).

Semences, matériel végétal, terre et milieux de culture

La mondialisation des marchés des semences et du matériel végétal est l'une des principales causes de la propagation récente et rapide des agents pathogènes nuisibles aux végétaux à de nouveaux hôtes. En outre, certains des agents pathogènes et des insectes nuisibles nouvellement introduits, typiques des régions chaudes, se propagent facilement dans les régions tempérées, en raison de la hausse des températures. Les semences sont généralement des vecteurs d'organismes nuisibles. Les végétaux arrivés à maturité sont également d'importants vecteurs d'insectes vivants, notamment les mites, les pucerons, les chenilles, les mineuses des feuilles et les thrips. C'est pourquoi l'Australie a par exemple réalisé une ARP sur des fleurs coupées en répertoriant les principaux insectes qui leur sont associés.

Lorsque l'on observe la dissémination récente de nouveaux agents pathogènes dans différents pays, en particulier dans le secteur maraîcher, il apparaît clairement que leur diffusion est favorisée par la mondialisation des marchés, puisque les semences sont des vecteurs des agents pathogènes. De plus, les effets du réchauffement climatique sur les végétaux et leurs hôtes contribuent également à cette dissémination. C'est le cas, par exemple, d'*Alternaria* spp., de *Fusarium equiseti* et de *Myrothecium* spp., récemment observés sur des laitues, de la roquette sauvage et cultivée, de la mâche, du basilic et des épinards (Gilardi, Garibaldi et Gullino, 2018). Les virus de la tomate (comme le *virus du fruit rugueux brun de la tomate*) et les viroïdes (comme la *viroïde des tubercules fusiformes de la pomme de terre*) figurent parmi les agents pathogènes les plus fréquemment observés ces derniers temps. Le *virus du fruit rugueux brun de la tomate* est apparu au cours des dernières années et s'est facilement propagé en raison du déplacement des semences. De nombreux agents pathogènes responsables d'importantes pertes de légumes feuilles, comme ceux mentionnés plus haut, peuvent être véhiculés par les semences et donc passer inaperçus. Ainsi, même de faibles niveaux d'infection des semences peuvent provoquer l'apparition rapide de nouvelles maladies dans des zones géographiques éloignées (Gitaitis et Walcott, 2007; Gullino, Gilardi et Garibaldi, 2014a, 2019; Munkvold, 2009). Malheureusement, comme le montrent

de nombreuses introductions récentes, ce phénomène est très répandu, malgré l'existence de normes internationales et de celles appliquées par les professionnels du secteur pour réduire ce risque.

De par son caractère international, le secteur des plantes ornementales pâtit largement de l'introduction d'organismes nuisibles par le biais de matériaux infectés (Daughtrey et Buitenhuis, 2020). Qu'elles soient issues de semences, de boutures ou de sections de tiges, les plantes ornementales peuvent facilement abriter des organismes nuisibles. Seules les plantes micro-propagées par culture tissulaire (généralement des plantes à feuilles) présentent un très faible risque d'infection par des agents pathogènes, pour autant qu'elles soient maintenues propres afin d'éviter toute réinfection (Chen et Henny, 2006). Plusieurs des insectes et mites nuisibles qui endommagent le plus les cultures sous serre sont issus de l'importation de matériel végétal infesté et ont pu s'établir rapidement en raison des conditions environnementales particulières des serres (Albajes *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2015). Les caféiers ornementaux importés du Costa Rica et infectés par *Xylella fastidiosa* subsp. sont considérés comme étant le possible vecteur de cet agent pathogène destructeur en Europe (Bergsma-Viami *et al.*, 2015).

La terre et le terreau, souvent importés, peuvent abriter des agents pathogènes (*Fusarium* spp. ou des nématodes, par exemple), des larves d'insectes nuisibles et des semences d'adventices. Ce phénomène a été bien documenté en ce qui concerne la tourbe et d'autres milieux de culture utilisés dans le secteur des plantes ornementales et dans les pépinières. La contamination des substrats de culture par des agents pathogènes terricoles (par exemple, *Fusarium oxysporum*, *Pythium* spp. et *Rhizoctonia solani*) empêche une désinfestation complète et provoque des attaques précoces sur les jeunes plantes (Garibaldi et Gullino, 1995).

Outre le risque phytosanitaire posé par le déplacement des semences, du matériel végétal, de la terre et des milieux de culture décrit ci-dessus, un nouveau type de menace est apparu ces dernières années avec l'augmentation du commerce électronique qui facilite la diffusion du matériel végétal à travers le monde. Le matériel végétal commercialisé est souvent de mauvaise qualité et ne fait généralement pas l'objet de contrôles phytosanitaires, ce qui constitue un nouveau type de menace. Cette question n'est pas prise en compte pour le moment, mais elle devra l'être à l'avenir.

Moyens de transport, cargaisons et déplacements d'animaux

Les tracteurs, les voitures, les camions, les trains, les navires, les avions, les conteneurs, le matériel agricole d'occasion, entre autres, sont autant de vecteurs courants de déplacement involontaire des organismes nuisibles. En effet, les phytopathologistes, les entomologistes et les malherbologistes considèrent souvent que la rapidité de dissémination des organismes nuisibles est directement liée à la rapidité des moyens de transport.

Les organismes vivants peuvent également propager des organismes nuisibles comme les semences d'adventices présentes sur la peau ou la fourrure des animaux. Par exemple, le déplacement de troupeaux par les communautés pastorales vers de nouveaux territoires à la recherche de pâturages a disséminé des semences de la plante exotique envahissante *Parthenium hysterophorus* en Afrique orientale et australe (McConnachie *et al.*, 2011).

Le réseau mondial de transport maritime est largement reconnu comme étant une filière de propagation pour les espèces envahissantes. On sait par exemple qu'une espèce d'insecte, la spongieuse asiatique, *Lymantria dispar*, s'est répandue dans le monde via le transport maritime, notamment par le biais des navires et des conteneurs d'expédition. Cette espèce peut être introduite dans une nouvelle zone lorsque le port présente un climat propice à la survie et à l'établissement de l'espèce. Deux sous-espèces, d'origines géographiques différentes, sont aujourd'hui connues, et la menace d'expansion de la répartition mondiale de la sous-espèce asiatique a été estimée à l'aide d'un modèle CLIMEX (Paini *et al.*, 2018).

La punaise marbrée *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) est un autre exemple d'insecte envahissant qui se déplace essentiellement par le biais du commerce international en

étant convoyée par des marchandises non réglementées comme les machines, les conteneurs et les véhicules, mais aussi par les voyageurs et, dans une moindre mesure, par le déplacement de matériel végétal. La punaise marbrée est extrêmement polyphage et se nourrit de plus de 300 espèces de plantes-hôtes, parmi lesquelles des cultures vivrières, des arbres forestiers et des plantes ornementales. Depuis son introduction, très vraisemblablement depuis l'Amérique du Nord, cet organisme nuisible a entraîné de lourdes pertes économiques dans des cultures de noisetiers en Géorgie et dans des cultures fruitières en Italie. Burne (2019) présente dans ses travaux un rapport détaillé portant sur une évaluation du risque phytosanitaire posé par l'introduction et l'établissement de *H. halys*.

Voyageurs

Que ce soit dans le cadre du tourisme ou des voyages d'affaires, les personnes sont des vecteurs importants d'organismes nuisibles, surtout en l'absence de contrôles stricts aux points d'entrée. Les touristes, notamment, ramènent souvent avec eux de la nourriture, des semences ou des plantes exotiques, qui peuvent être infestées par des organismes nuisibles ou constituer elles-mêmes des organismes nuisibles. Pour lutter contre ce phénomène, de plus en plus de pays affichent des messages de sensibilisation aux points d'entrée (aéroports et ports), afin d'expliquer aux voyageurs la menace que représente la circulation des végétaux et des parties de végétaux pour la biosécurité. De nombreux pays inspectent les bagages et les envois postaux à la recherche d'aliments et d'autres matériels présentant un risque pour la biosécurité, et incitent les passagers à l'arrivée à déclarer les articles susceptibles de poser un risque pour la biosécurité. Ils contrôlent les passagers et leurs bagages en utilisant des scanners à rayons X, des chiens renifleurs ou encore en effectuant des contrôles manuels. Les passagers qui transportent du matériel à risque sont passibles d'une amende et peuvent même se voir refuser l'entrée sur le territoire. À cet égard, des pays comme l'Australie, la Nouvelle-Zélande et les États-Unis d'Amérique (McCullough *et al.*, 2006) appliquent depuis longtemps des contrôles stricts et ont pour habitude de recueillir et de consigner les données relatives aux interceptions.

Dispersion naturelle

On a pu observer que plusieurs organismes nuisibles endémiques et non endémiques ont considérablement étendu leur aire de répartition de manière naturelle (c'est-à-dire sans intervention humaine). Ces déplacements sont souvent dus à de profonds changements en lien avec le climat ou la répartition des hôtes. Parmi les différents aspects liés aux changements climatiques, la hausse des températures a particulièrement favorisé l'expansion des aires de répartition des organismes nuisibles, notamment sous les latitudes élevées et en altitude. En Europe, par exemple, la hausse des températures hivernales a facilité la survie des larves et la dispersion nocturne de la population adulte de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa*, favorisant ainsi l'expansion de son aire de répartition vers le nord du continent (Battisti *et al.*, 2006). En outre, le vent et les tempêtes peuvent transporter des spores d'agents pathogènes sur de longues distances, voire même d'un continent à l'autre. Par exemple, on prévoit que l'évolution de la configuration des vents ou des tempêtes contribuera à élargir l'aire de répartition de la rouille noire du blé, causée par *Puccinia graminis* (Prank *et al.*, 2019). De même, la rouille du goyavier (*Austropuccinia psidii*), détectée pour la première fois en Australie en 2010 sur la côte centrale de la Nouvelle-Galles du Sud, étend sa répartition et est désormais présente dans plusieurs écosystèmes forestiers naturels, provoquant divers dégâts comme des taches foliaires mineures, de graves brûlures des pousses et des tiges, voire le dépérissement des arbres (Pegg *et al.*, 2017). La répartition de plusieurs organismes nuisibles, par exemple les mouches des fruits, peut évoluer sous l'effet des ouragans dans les Caraïbes, en Amérique centrale et dans le sud des États-Unis d'Amérique. Par exemple, en suivant le parcours de l'ouragan Carla, Flitters (1963) a observé une recrudescence anormalement élevée de plusieurs espèces d'insectes au Texas, laissant penser qu'elles auraient été déplacées par l'ouragan depuis des zones éloignées.

Approches utilisées pour étudier les effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux

Au cours des 30 à 40 dernières années, plusieurs études ont cherché à évaluer les effets de plusieurs facteurs – augmentation des températures, du CO₂, de l’ozone ou du rayonnement ultraviolet B, et évolution des conditions hydriques ou d’humidité – sur l’incidence et la gravité des phytopathologies. Les études ont porté sur les organismes nuisibles qui affectent les cultures de plein champ comme le blé, l’orge, le riz, le soja et la pomme de terre (Bregaglio, Donatelli et Confalonieri, 2013; Evans *et al.*, 2008; Launay *et al.*, 2014; Luck *et al.*, 2011; Mikkelsen, Jørgensen et Lyngkjær, 2014), les cultures horticoles (Gullino *et al.*, 2018; Koo, Hong et Yun, 2016), notamment les cultures tropicales et de plantation (Ghini, Hamada et Bettiol, 2011), et les arbres forestiers (Battisti, 2008; Jactel, Koricheva et Castagneyrol, 2019; Sturrock *et al.*, 2011).

Ces études se sont appuyées sur diverses approches de recherche (voir le tableau 1). Certaines ont consisté en des expériences destinées à examiner les effets induits par la modification d’un ou de plusieurs paramètres météorologiques. D’autres études ont examiné les espèces présentes le long de gradients latitudinaux ou altimétriques en tant qu’indicateur des changements climatiques au fil du temps. Outre ces approches empiriques, des approches « théoriques » ont également été adoptées, comme la méta-analyse des résultats de diverses études ou l’analyse d’ensembles de données à long terme. Enfin, certaines études se sont appuyées sur des avis d’experts ou ont généré des modèles de simulation afin de prédire comment les changements prévus dans le climat ou la composition de l’atmosphère modifieront la répartition, la prévalence et la gravité des organismes nuisibles et autres organismes ainsi que la lutte contre ces derniers.

Les approches expérimentales peuvent fournir des informations utiles à propos des effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles et les phytopathologies, mais peu d’études de ce type sont parvenues à reproduire de manière réaliste les changements climatiques (Chakraborty et Newton, 2011; Ingram, Gregory et Izac, 2008; Loustau *et al.*, 2007; Luck *et al.*, 2011; Pautasso *et al.*, 2012). Certaines études sur les changements climatiques menées avec des systèmes d’enrichissement en CO₂ à l’air libre (FACE) et dans des chambres à toit ouvert ont permis de mieux comprendre les effets de différents paramètres sur le développement des phytopathologies dans diverses cultures (Eastburn, McElrone et Bilgin, 2011) (figure 5). Ces systèmes ont également été utilisés pour étudier les adventices (Williams *et al.*, 2007) et les insectes (Delucia *et al.*, 2012). De manière générale, la plupart des études menées à l’aide des systèmes FACE dans des conditions de CO₂ élevé ont révélé une augmentation des problèmes liés aux insectes et aux maladies, comme l’ont récemment résumé Ainsworth et Long (2021).

Les phytotrons – chambres environnementales destinées à évaluer les effets de différentes combinaisons de paramètres environnementaux (Gullino *et al.*, 2011; Hakata *et al.*, 2017) – permettent d’étudier les effets de l’augmentation du CO₂ et de la température pendant une courte durée sur les relations hôte-pathogène (Gullino *et al.*, 2018), afin de comprendre comment certaines maladies pourraient évoluer à l’avenir (figure 6). Les résultats de ces études peuvent servir à mettre au point des solutions pratiques pour faire face aux scénarios futurs, par exemple en soutenant les activités de sélection végétale. Ils peuvent également permettre d’étudier d’autres effets, plus indirects, des changements climatiques sur les végétaux, comme l’impact sur la production de mycotoxines ou sur les pratiques de lutte contre les maladies (Gilardi *et al.*, 2017; Gullino *et al.*, 2020).

Parmi les approches de terrain en milieu naturel on trouve des recherches le long d’un gradient altimétrique comprenant des sites de basse à haute altitude (Betz, Srisuka et Puthz,

2020; Garibaldi, Kitzberger et Chaneton, 2011), avec les changements de température et d'humidité de l'air qui y sont associés, et des travaux menés dans différents habitats le long d'un gradient latitudinal, par exemple dans des conditions climatiques subtropicales, tempérées et semi-arides (Bairstow *et al.*, 2010; Scalone *et al.*, 2016). La première approche présente l'avantage d'avoir une photopériode identique le long du gradient altimétrique. Dans la seconde approche, la photopériode est susceptible de varier le long du gradient latitudinal. Sous les tropiques, par exemple, les jours sont plus courts et les nuits plus longues en été et inversement en hiver, contrairement aux régions tempérées. Ces différences de photopériode doivent être prises en compte lors de l'interprétation des résultats. Néanmoins, ce type d'approche est utile pour identifier les grandes tendances sur de larges gradients environnementaux et dans une série de régions climatiques en conditions réelles. Ces études peuvent aussi aider à déterminer si une espèce donnée est limitée à un climat spécifique ou si elle est largement répandue et risque de se propager à des zones qui se réchauffent (Juroszek et von Tiedemann, 2013a).

Des méta-analyses d'ensembles de données publiées ont été réalisées afin d'identifier des tendances générales concernant la réaction de certains organismes nuisibles lorsqu'ils sont exposés à des variables climatiques changeantes (Koricheva et Larsson, 1998; Massad et Dyer, 2010; Vila *et al.*, 2021). En outre, des ensembles de données à long terme issues d'observations de terrain ont été utilisés pour étudier les effets des changements climatiques déjà perceptibles en raison du réchauffement survenu ces dernières décennies (Altermatt, 2010; Huang et Hao, 2020; Jeger et Pautasso, 2008). Ces ensembles de données à long terme peuvent servir de base de référence pour de futures études (Huang et Hao, 2020; Robinet et Roques, 2010) car ils peuvent aider les chercheurs à faire la distinction entre les impacts dus aux changements climatiques et ceux résultant d'autres facteurs (Garrett *et al.*, 2016, 2021). Certains chercheurs ont essayé d'affiner les prévisions des effets du réchauffement climatique sur les insectes en combinant des données issues d'ensembles de données à long terme, d'expériences à grande échelle et de travaux de modélisation informatique (Diamond, 2018; Grünig *et al.*, 2020; Lehmann *et al.*, 2020). Par exemple, une méta-analyse de données issues d'études en laboratoire a conclu que les niveaux trophiques supérieurs (les prédateurs, par exemple) sont davantage sensibles aux changements climatiques que les organismes d'ordre inférieur (végétaux ou insectes herbivores) (Fussmann *et al.*, 2014). Ce type d'information est utile lorsque l'on étudie l'impact de l'évolution du rôle des ennemis naturels sur la dynamique des insectes nuisibles et la lutte biologique dans le contexte des changements climatiques, sujet sur lequel très peu de données de terrain sont disponibles (Thomson, MacFadyen et Hoffman, 2010).

Les modèles de simulation peuvent être utilisés pour prévoir les effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles (Sutherst, 1991; Sutherst *et al.*, 2011) et déterminer les tactiques et stratégies de lutte contre ces derniers (Ghini, Hamada et Bettiol, 2008; Hill et Thomson, 2015; Salinari *et al.*, 2007; Shaw et Osborne, 2011). L'une des approches de modélisation consiste, par exemple, à utiliser la «correspondance climatique», qui permet d'étudier une zone géographique dont le climat actuel est analogue au climat futur de la zone considérée (dans le cas présent, pour l'étude de la dynamique des organismes nuisibles), puis d'extrapoler les résultats pour concevoir un scénario futur pour cette même zone (Sutherst, Maywald et Russell, 2000). D'autres approches de modélisation utilisent des ensembles de données à long terme en ce qui concerne les paramètres météorologiques, le développement des cultures, ainsi que la répartition et la prévalence des organismes nuisibles, afin de développer et de valider des modèles «organisme nuisible-culture-climat» (Angelotti *et al.*, 2017; Madgwick *et al.*, 2011). D'autres exemples récents d'études réalisées à partir de modélisations (voir le tableau 2) prennent en compte des paramètres comme le nombre de générations par an pour les insectes nuisibles, le moment de la floraison des plantes et la gravité des maladies associées, ainsi que la répartition globale des adventices.

Tableau 1 Exemples d'approches expérimentales et théoriques utilisées dans la recherche sur la biologie des changements climatiques

TYPE D'APPROCHE	DESCRIPTION ET OBSERVATIONS	RÉFÉRENCES
Expériences dans des conditions contrôlées	Les conditions contrôlées ne sont pas réalistes, mais cette approche permet d'étudier plus facilement un ou plusieurs paramètres environnementaux compte tenu de leur faible variabilité et du nombre réduit d'interactions.	Gullino <i>et al.</i> , 2018.
Expériences sur site, en exploitation et dans des conditions naturelles	Les conditions de terrain sont réalistes, mais les paramètres environnementaux sont difficiles à contrôler en raison de leur variabilité et de leurs interactions complexes.	Raderschall <i>et al.</i> , 2021; Torresen <i>et al.</i> , 2020.
Études le long d'un gradient altimétrique comprenant des sites de basse à haute altitude	Les effets des changements de température et de précipitations peuvent être étudiés sur une courte distance, avec une photopériode inchangée (cela permet, par exemple, de comparer les caractéristiques d'une même espèce).	Betz, Srisuka et Puthz, 2020.
Études le long d'un gradient latitudinal	Il est possible d'effectuer des recherches le long d'un gradient climatique allant de tempéré à tropical, avec des changements de température et de précipitations sur de longues distances, mais la durée du jour peut varier d'un endroit à l'autre (par exemple, les caractéristiques d'une même espèce, ou la biodiversité des espèces en général, peuvent être comparées dans différents climats).	Scalone <i>et al.</i> , 2016.
Méta-analyse d'ensembles de données publiées	Il s'agit d'identifier des tendances générales concernant la réaction de certains taxons aux variations des facteurs climatiques. Un nombre suffisant de résultats doit être publié pour pouvoir tirer des conclusions significatives.	Seidl <i>et al.</i> , 2017.
Suivi des données et ensembles de données à long terme concernant différents paramètres	Il s'agit d'observations de terrain à long terme qui permettent d'étudier les effets des changements climatiques apparus au cours des dernières décennies. Cette approche implique de disposer de relevés météorologiques à long terme et, le cas échéant, d'autres ensembles de données à long terme pour rechercher d'autres raisons pouvant expliquer les changements observés (en particulier dans les systèmes aménagés).	Huang et Hao, 2020; Palmer <i>et al.</i> , 2017.
Avis d'experts	Recours à des expériences à long terme et aux connaissances d'experts. Le cycle de vie complet d'une espèce d'organisme nuisible peut être appréhendé en théorie, mais cette approche demeure quelque peu subjective.	Karkanis <i>et al.</i> , 2018.
Approche dite de «correspondance climatique»	On observe dans une zone donnée un climat analogue à celui qui est anticipé pour l'avenir et on étudie la dynamique des organismes nuisibles dans ladite zone afin de comprendre la dynamique comparative (en utilisant par exemple le modèle dynamique de correspondance climatique CLIMEX). D'autres outils peuvent également être utilisés, comme le logiciel MaxEnt, qui permet de comparer l'adéquation de l'habitat pour une espèce donnée en différents endroits.	Biber-Freudenberger <i>et al.</i> , 2016; Sutherst, Maywald et Russell, 2000.
Modélisation qui utilise un ou plusieurs scénarios ou modèles de changement climatique, ou des ensembles complets de scénarios ou de modèles de changement climatique, pour simuler les futurs risques phytosanitaires.	Cette approche permet de classer les scénarios ou les modèles utilisés en différentes catégories allant de «scénario prudent» à «pire scénario» et permet également d'effectuer des classements au sein d'un même modèle de changement climatique lorsque différents scénarios de profil représentatif d'évolution de concentration (RCP) sont appliqués (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5). Néanmoins, l'utilisation d'un scénario spécifique de changement climatique dans un même modèle climatique n'est plus jugée adéquate, car elle n'intègre pas les éventuelles variations. C'est pourquoi on privilégie souvent des ensembles complets de scénarios ou de modèles de changement climatique.	Angelotti <i>et al.</i> , 2017; Launay <i>et al.</i> , 2020.

CLIMEX, modélisation des événements climatiques extrêmes; RCP: profil représentatif d'évolution de concentration.

N.B.: Les références ont été sélectionnées de manière subjective, en accordant néanmoins la priorité aux études postérieures à 2000.

Source: Adapté à partir des travaux de Juroszek et von Tiedemann, 2013a.

Figure 5A



Chambres à toit ouvert pour l'étude des effets de l'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'air à Petrolina (Brésil)

Figure 5B



Figure 6



Phytotrons utilisés pour la croissance végétative dans des conditions contrôlées
En simulant de multiples facteurs environnementaux, les phytotrons permettent d'étudier les effets des changements climatiques sur les végétaux et leurs agents pathogènes.

Tableau 2 Exemples d'études de simulation du risque phytosanitaire où les modèles d'organismes nuisibles ont été croisés avec des scénarios de changement climatique

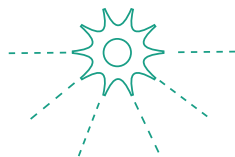
PAYS OU RÉGION	PÉRIODES/DATES	CULTURES TOUCHÉES, ESPÈCES D'ORGANISMES NUISIBLES ET CHANGEMENTS ANTICIPÉS	RÉFÉRENCES
INSECTES			
Suisse	2070-2099	Diverses cultures: La punaise marbrée (<i>Halyomorpha halys</i>), qui possède une large gamme d'hôtes potentiels, devrait s'étendre à des altitudes plus élevées, produire davantage de générations par an et être active plus précocement au printemps.	Stoeckli, Felber et Haye, 2020.
Monde entier	2050, 2100	Diverses cultures: Les simulations prévoient une extension des zones propices à l'établissement de la chenille légionnaire d'automne (<i>Spodoptera frugiperda</i>).	Zacarias, 2020.
Monde entier	2050	Tomate: D'après les simulations, plusieurs pays pourraient voir augmenter le nombre de foyers de tétranyques tisserands (<i>Tetranychus urticae</i>), et la lutte biologique par son principal prédateur, <i>Phytoseiulus persimilis</i> , ne s'améliorera pas.	Litkas <i>et al.</i> , 2019.
Midwest (États-Unis d'Amérique)	2001-2050, 2051-2100	Maïs et soja: De manière générale, la pression exercée par neuf insectes nuisibles différents devrait augmenter. Plusieurs insectes nuisibles se déplaceront vers les régions septentrionales, car c'est dans ces zones qu'ils trouveront des «conditions climatiques optimales».	Taylor <i>et al.</i> , 2018.
Monde entier	2041-2060, 2061-2080	Pomme de terre: On prévoit une expansion du doryphore de la pomme de terre (<i>Leptinotarsa decemlineata</i>) dans les régions septentrionales.	Wang <i>et al.</i> , 2017.
Afrique	2041-2060	Diverses cultures: D'après les simulations, <i>Bactrocera dorsalis</i> , <i>Ceratitis cosyra</i> et <i>Tuta absoluta</i> devraient trouver des habitats propices dans davantage de zones à travers le continent.	Biber-Freudenberger <i>et al.</i> , 2016.
Luxembourg	2021-2050, 2069-2098	Colza: D'après les simulations, <i>Meligethes aeneus</i> devrait envahir les cultures plus tôt dans l'année.	Junk, Jonas et Eickermann, 2016.
Scandinavie et Europe centrale	2011-2040, 2071-2100	Arbres forestiers, notamment les épicéas: On prévoit une augmentation de la fréquence et de la durée des épisodes d'essaimage du bostryche typographe (<i>Ips typographus</i>) en fin à la fin de l'été. On pourrait voir se développer une deuxième génération dans le sud de la Scandinavie et une troisième dans les plaines d'Europe centrale.	Jönsson <i>et al.</i> , 2011.
AGENTS PATHOGÈNES (MALADIES)			
France	2020-2049, 2070-2099	Blé: D'après les simulations, le risque de rouille des feuilles (causée par <i>Puccinia tritica</i>) pourrait augmenter.	Launay <i>et al.</i> , 2020.
France	2020-2049, 2070-2099	Abricot: Le risque de brûlure des fleurs et de brûlure des rameaux (causées par <i>Monilinia laxa</i>) devrait diminuer ou augmenter, selon le type de cultivar (floraison précoce ou tardive).	Tresson <i>et al.</i> , 2020.
Canada, Québec	2041-2070	Soja: D'après les simulations, le nombre de générations du nématode du soja (<i>Heterodera glycines</i>) devrait augmenter.	St-Marseille <i>et al.</i> , 2019.
Monde entier	2050, 2100	Soja: Les simulations prévoient une réduction des zones propices au développement de la rouille du soja (causée par <i>Phakopsora pachyrhizi</i>).	Ramirez-Cabral, Kumar et Shabani, 2019.
Philippines	2050	Banane: Les simulations prévoient une extension des zones propices au développement de la fusariose du bananier (causée par <i>Fusarium oxysporum</i>).	Salvacion <i>et al.</i> , 2019.
Chine centrale	Décennie 2030, Décennie 2050, Décennie 2070, Décennie 2080	Kiwi: Les simulations prévoient une extension des zones propices au développement du chancre bactérien (causé par <i>Pseudomonas syringae</i>).	Wang <i>et al.</i> , 2018.
Europe	2070	Pins: Le risque de maladie du dépérissement du pin (causée par le nématode du pin, <i>Bursaphelenchus xylophilus</i>) devrait augmenter.	Ikegami et Jenkins, 2018.

Brésil	2011-2040, 2041-2070, 2071-2100	Vigne: Les simulations prévoient une réduction des zones propices au développement du mildiou de la vigne (causé par <i>Plasmopara viticola</i>) dans l'ensemble du Brésil, avec néanmoins des différences selon les régions ou les États.	Angelotti <i>et al.</i> , 2017.
Italie	2030 2050 2080	Vigne: On prévoit une hausse de la prévalence du mildiou de la vigne (<i>Plasmopara viticola</i>), en raison de l'augmentation du nombre de jours de printemps offrant des conditions favorables, et des attaques plus précoces qui nécessiteront davantage de traitements.	Salinari <i>et al.</i> , 2006.
Inde	2010-2039, 2040-2069	Riz: La capacité d'infection de la brûlure des feuilles (causée par <i>Magnaporthe oryzae</i>) devrait augmenter pendant la saison hivernale (décembre à mars), mais devrait demeurer inchangée, voire diminuer légèrement, pendant la saison de la mousson (juillet à octobre).	Viswanath <i>et al.</i> , 2017.
Sud-ouest de l'Allemagne	2050, 2100	Betterave sucrière: D'après les simulations, le risque de cercosporiose (causée par <i>Cercospora beticola</i>) pourrait augmenter.	Kremer <i>et al.</i> , 2016.
ADVENTICES			
Monde entier	2050	Les simulations prévoient, de manière générale, une réduction des zones propices à la croissance de 32 espèces d'adventices envahissantes à travers le monde. Néanmoins, les zones favorables au développement de la plupart de ces 32 espèces d'adventices devraient s'étendre dans les pays européens, dans le nord du Brésil, dans l'est des États-Unis d'Amérique et dans le sud-est de l'Australie.	Shabani <i>et al.</i> , 2020.
Chine	2070-2099	Sur un total de huit espèces d'adventices exotiques envahissantes, les simulations prévoient une extension des zones propices au développement de six d'entre elles.	Wan et Wang, 2019.
Monde entier	2041-2060, 2061-2080	D'après les simulations, les zones propices au développement de la morelle rostrée (<i>Solanum rostratum</i>) devraient s'étendre aux latitudes circumpolaires.	Wan et Wang, 2019.
Monde entier	2050	Les simulations prévoient une extension des zones adaptées au développement du lantaniar (<i>Lantana camara</i>), avec néanmoins des écarts considérables d'un continent à l'autre.	Qin <i>et al.</i> , 2016.
Monde entier	2100	Les simulations prévoient une extension des zones adaptées au développement de l'ivraie raide (<i>Lolium rigidum</i>) en Amérique du Nord, en Amérique du Sud, en Europe et en Asie, alors qu'une réduction est anticipée en Afrique et en Océanie.	Castellanos-Frías. <i>et al.</i> , 2016.
Colorado (États-Unis d'Amérique)	2050	Les simulations prévoient une extension des zones propices au développement de <i>Bromus tectorum</i> .	West <i>et al.</i> , 2015.
Europe	2010-2030, 2050-2070	Les simulations prévoient une extension des zones adaptées au développement de l'ambrosie à feuilles d'armoise (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>) vers les régions septentrionales. En revanche, son expansion devrait demeurer limitée dans le sud de l'Europe en raison du stress causé par la sécheresse.	Storkey <i>et al.</i> , 2014.
Centre de l'Argentine	2020-2040	D'après les simulations, le sorgho d'Alep (<i>Sorghum halepense</i>) devrait prospérer.	Leguizamon et Acciaresi, 2014.

N.B.: Les études citées ont été sélectionnées de manière subjective, en accordant néanmoins la priorité aux publications récentes. On trouve dans la littérature d'autres tableaux récapitulatifs qui présentent des résultats de simulations: agents pathogènes et maladies (Juroszek et von Tiedemann, 2015; Miedaner et Juroszek, 2021a, par exemple), insectes nuisibles (Choudhary, Kumari et Fand, 2019, par exemple) et adventices (Clements, DiTommaso et Hyvönen, 2014, par exemple).

Effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux





La présente section porte sur les effets potentiels des changements climatiques sur les organismes nuisibles et donc sur la santé des végétaux, d'abord en examinant les grandes tendances, puis en analysant, sous forme d'études de cas, les effets sur certaines espèces ou certains groupes d'espèces.

Simulation des futurs risques phytosanitaires

Les simulations présentées ici visent à déterminer les futurs risques phytosanitaires selon différents scénarios de changement climatique. Elles utilisent essentiellement des modèles de répartition des espèces, des modèles de dynamique des populations ou des modèles hybrides associant les deux modèles précités (tableau 2). Les facteurs climatiques pris en compte dans ces études comprennent la température, les précipitations et l'humidité, mais le paramètre de CO₂ élevé n'est généralement pas pris en compte (Eastburn, McElrone et Bilgin, 2011; Juroszek et von Tiedemann, 2015). Les effets des changements climatiques sont probablement plus faciles à prévoir pour les espèces d'organismes nuisibles qui sont surtout sensibles à la température. En revanche, les prédictions sont plus difficiles à établir en ce qui concerne les organismes nuisibles dont la reproduction et la dissémination sont fortement liées à la disponibilité en eau, au vent et à la gestion des cultures. Cela vaut également pour les organismes nuisibles particulièrement sensibles aux interactions avec d'autres organismes tels que les vecteurs d'agents pathogènes (Trebecki et Finlay, 2019), sauf dans les cas où leurs interactions sont étudiées en détail (Juroszek et von Tiedemann, 2013a) et donc prévisibles (voir l'étude de cas pour *Xylella fastidiosa*).

Les résultats des simulations dépendent du matériel et des méthodes utilisés, notamment le modèle climatique mondial retenu, les scénarios d'émissions, le modèle climatique régional et le modèle spécifique de l'organisme nuisible, ainsi que des paramètres spécifiques utilisés pour la simulation (Miedaner et Juroszek, 2021a). Tous ces éléments façonnent le résultat des projections relatives au risque phytosanitaire (Gouache *et al.*, 2013; Juroszek et von Tiedemann, 2013b; Launay *et al.*, 2020) et doivent être pris en compte lors de la lecture et de l'interprétation des résultats des études réalisées à partir de simulations, comme celles présentées dans le tableau 2. En outre, il convient de noter que l'incidence des changements climatiques sur le risque phytosanitaire peut varier d'un pays à l'autre (entre les plaines et les montagnes, le nord et le sud, l'été et l'hiver, les saisons chaudes et humides et les saisons fraîches et sèches, par exemple), comme l'ont récemment souligné Miedaner et Juroszek (2021a).

D'après Juroszek et von Tiedemann (2015), si l'on considère l'augmentation de la température comme le paramètre ayant le plus d'impact sur les résultats, l'évolution (augmentation ou diminution) du risque phytosanitaire anticipée grâce aux projections sera, de manière générale, davantage perceptible à la fin du XXI^e siècle. Cette hypothèse va dans le sens des prévisions selon lesquelles le réchauffement climatique devrait être plus important à la fin du XXI^e siècle qu'au milieu ou au début du siècle (par exemple avec une augmentation de la température mondiale de 3 °C en fin de siècle, contre 2 °C au milieu et 1 °C au début).

Les évolutions prévues en matière de risque phytosanitaire varient en fonction de la localisation géographique (Sidorova et Voronina, 2020). Par exemple, une première étude de simulation des futurs risques phytosanitaires induits par les changements climatiques a permis de prédire une augmentation du risque de pyriculariose du riz, causée par le champignon *Magnaporthe grisea*, dans les régions rizicoles subtropicales et fraîches comme le Japon,

alors que dans les régions tropicales chaudes et humides, comme dans le cas des Philippines, le risque de pyriculariose du riz devrait diminuer à l'avenir (Luo *et al.*, 1995 et 1998). S'agissant des insectes nuisibles, les projections réalisées par Kocmánková *et al.* (2011) indiquent que la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) et le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*) vont probablement accroître leurs aires de répartition dans de nombreuses régions d'Europe, s'établir à des altitudes plus élevées et augmenter le nombre annuel de leurs générations en raison des hausses de température anticipées. D'autre part, le réchauffement climatique pourrait entraîner des hausses de température proches de la limite létale supérieure de certaines espèces d'insectes, notamment pendant l'été dans les régions tempérées (Bale et Hayward, 2010; Harvey *et al.*, 2020) et dans les régions tropicales déjà très chaudes (Deutsch *et al.*, 2008). Cette variation de l'impact en fonction de la zone géographique implique que les généralisations doivent être envisagées avec beaucoup de précaution et que les chercheurs doivent se montrer très prudents lorsqu'ils extrapolent leurs résultats (Juroszek *et al.*, 2020).

Récemment, Seidl *et al.* (2017) ont publié une analyse globale et complète des résultats disponibles (plus de 1 600 observations uniques) et ont conclu qu'environ deux tiers de l'ensemble des observations montrent que le risque d'apparition de facteurs de stress abiotique (incendies et épisodes de sécheresse, par exemple) et biotique (présence d'insectes nuisibles et d'agents pathogènes, par exemple) augmentera dans le secteur forestier à l'échelle mondiale. Les conditions climatiques plus chaudes et plus sèches favorisent les nuisances causées par les insectes, tandis que les conditions climatiques plus chaudes et plus humides favorisent les nuisances causées par les agents pathogènes. La même tendance est anticipée concernant de nombreuses maladies des cultures (Juroszek et von Tiedemann, 2015), des insectes nuisibles (Choudhary, Kumari et Fand, 2019) et des adventices (Clements, DiTommaso et Hyvönen, 2014), avec une hausse du risque phytosanitaire dans la plupart des cas. Ainsi, des mesures de prévention, d'atténuation et d'adaptation devront être prises à l'avenir pour réduire les hausses anticipées du risque phytosanitaire dans l'agriculture, l'horticulture, la foresterie ainsi que dans les zones urbaines et les parcs nationaux (Edmonds, 2013; Pautasso, 2013). Un débat est actuellement en cours entre les organisations de protection de l'environnement et les services phytosanitaires sur la manière de traiter les infestations d'organismes nuisibles dans les parcs nationaux et les zones protégées, ainsi que sur la question sensible de savoir s'il faut intervenir dans des écosystèmes actuellement non aménagés.

Effets sur les espèces d'organismes nuisibles

Les effets des changements climatiques sur les espèces d'organismes nuisibles sont complexes et se caractérisent par des effets directs et indirects, voire par des interactions entre ceux-ci. En un lieu donné, toute modification du réchauffement et des autres conditions climatiques et atmosphériques peut avoir des effets directs ou indirects sur les insectes nuisibles, les agents pathogènes et les adventices. Parmi les possibles effets directs et indirects sur les organismes nuisibles figurent notamment: une modification de leur répartition géographique (extension ou rétrécissement) ou un risque accru d'introduction d'organismes nuisibles; une variation de la phénologie saisonnière, comme le moment de l'activité printanière ou la synchronisation des étapes du cycle de vie des organismes nuisibles avec leurs plantes hôtes et leurs ennemis naturels; et une évolution des différents aspects de la dynamique des populations, comme l'hivernage et la survie, les taux de croissance des populations ou le nombre de générations des espèces polycycliques (Juroszek et von Tiedemann, 2013a; Richerzhagen *et al.*, 2011).

En général, toutes les étapes importantes du cycle de vie des insectes nuisibles, des agents pathogènes et des adventices – survie, reproduction et dissémination – sont plus ou moins directement influencées par la température, l'humidité relative, la quantité de lumière ou sa qualité, le vent ou toute combinaison de ces facteurs. Les processus physiologiques de la plupart des espèces d'organismes nuisibles sont particulièrement sensibles aux variations de température (Juroszek *et al.*, 2020). Par exemple, des températures élevées peuvent favoriser tout particulièrement la propagation des virus des végétaux et de leurs insectes vecteurs jusqu'à ce que leur seuil de température supérieur soit atteint (Trebecki, 2020). Lors d'une expérience de terrain menée pendant trois ans sur du maïs en milieu tropical, Reynaud *et al.* (2009) ont montré que l'incidence de la striure du maïs (causée par le virus de la striure du maïs) et l'abondance de son vecteur, la cicadelle *Cicadulina mbila*, étaient étroitement corrélées à la température, les deux augmentant rapidement au-dessus de 24 °C, mais que les températures de 30 °C et plus pouvaient être préjudiciables à la cicadelle et à la transmission du virus (Juroszek et von Tiedemann, 2013c). On peut donc s'attendre à ce que le réchauffement climatique favorise de nombreux insectes vecteurs et les virus qu'ils véhiculent, du moins dans une certaine fourchette de températures.

Les effets indirects sont véhiculés par les plantes hôtes ou par les adaptations apportées à la gestion des cultures en raison des changements climatiques (Juroszek *et al.*, 2020). Un réchauffement de la température moyenne de l'air, en particulier au début du printemps dans les régions tempérées, pourrait conduire à ce que les étapes du cycle de vie des plantes hôtes surviennent plus tôt au cours d'une saison (Racca *et al.*, 2015). Ce phénomène peut avoir une incidence sur les agents pathogènes qui infectent les hôtes à un stade particulier du cycle de vie, par exemple les agents pathogènes du blé tels que les espèces de *Fusarium* qui infectent le blé pendant la floraison (Madgwick *et al.*, 2011; Miedaner et Juroszek, 2021a). Parmi les mesures d'adaptation de gestion des cultures face aux changements climatiques figurent notamment la mise en place de l'irrigation, l'arrêt du labour profond, le décalage des dates de semis et la plantation de plus d'une culture par an. L'irrigation des cultures de maïs dans le sud-est de l'Afrique a par exemple permis de cultiver cette céréale tout au long de l'année, mais elle a également entraîné une présence accrue des populations d'insectes vecteurs, provoquant une hausse de la pression exercée par le virus de la striure du maïs sur les cultures irriguées, puis sur les cultures pluviales (Shaw et Osborne, 2011).

Les interactions entre les différents facteurs ayant une incidence sur les organismes nuisibles peuvent être complexes. Par exemple, des expériences simulant des conditions réelles de terrain grâce au système FACE ont montré la complexité des interactions entre la croissance des adventices et la température, l'eau et le CO₂ dans des conditions environnementales modifiées (Williams *et al.*, 2007), et d'autres expériences ont montré que le stress hydrique peut modifier les relations de concurrence entre les adventices et les plantes cultivées dans des conditions de concentration élevée de CO₂ (Valerio *et al.*, 2011). Lorsque le régime hydrique est satisfaisant, la croissance de la tomate C₃ (*Lycopersicon esculentum*) bénéficie davantage de la concentration élevée de CO₂ que l'adventice C₄ *Amaranthus retroflexus*, alors que dans des conditions de stress hydrique, c'est le phénomène inverse qui se produit. Des expériences analogues (Valerio *et al.*, 2011; Williams *et al.*, 2007) menées dans des conditions contrôlées et sur le terrain laissent penser que l'on ne peut pas prévoir la réaction des végétaux à une concentration élevée de CO₂ en se fondant uniquement sur le type de cycle photosynthétique (C₃ ou C₄), car il existe toute une série d'interactions complexes avec divers facteurs, notamment la disponibilité en eau et la température. Ces conclusions vont dans le sens d'une méta-analyse récemment publiée (Vila *et al.*, 2021), qui visait notamment à comprendre les effets combinés des adventices et des changements climatiques sur les cultures.

Études de cas sur certaines espèces d'organismes nuisibles

Certains organismes nuisibles ont déjà élargi leur gamme d'hôtes ou leur aire de répartition, au moins en partie sous l'effet des changements climatiques. On trouvera ci-dessous des exemples de ce type d'organismes nuisibles, sélectionnés en fonction de leur importance dans différentes zones géographiques. On trouvera également dans le tableau 3 des exemples de possibles effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux (insectes, agents pathogènes et adventices) dans différentes zones climatiques.

Insectes

1. Agrile du frêne (*Agrilus planipennis*) (Asie, Europe, Amérique du Nord)

L'agrite du frêne, *Agrilus planipennis*, est un coléoptère qui se nourrit du phloème des frênes et infeste ces derniers (*Fraxinus* spp.) (OEPP, 2021b). Les coléoptères adultes puisent leur nourriture dans le feuillage des frênes, mais ce sont les larves, qui se nourrissent abondamment du phloème et du cambium, qui perturbent le processus de translocation dans l'arbre en le ceinturant (c'est-à-dire en enlevant un anneau d'écorce sur toute la circonférence de la branche ou du tronc), jusqu'à entraîner la mort de l'arbre.

Originaire du nord-est de la Chine, de la péninsule coréenne et de l'est de la Fédération de Russie, l'agrite du frêne s'est propagé à d'autres régions d'Asie, mais aussi en Amérique du Nord (Canada et États-Unis d'Amérique) (Haack *et al.*, 2002) et en Europe (régions occidentale et méridionale de la Fédération de Russie et Ukraine, par exemple) (CABI, 2021b). Pour ce qui est de l'Amérique du Nord, il a probablement été introduit en 2002 par le biais de matériaux d'emballage en bois, et certaines études dendrologiques indiquent qu'il serait arrivé sur le continent environ une décennie avant sa détection. Sa dissémination ultérieure à diverses régions des États-Unis d'Amérique et du Canada a probablement été facilitée par le déplacement de matériel de pépinière, de grumes et de bois de chauffage infestés (Hermes et McCullough, 2014; Ramsfield *et al.*, 2016).

Ce coléoptère provoque de graves dommages. Aukema *et al.* (2011) le considèrent comme l'insecte forestier envahissant le plus destructeur et le plus dévastateur sur le plan économique aux États-Unis d'Amérique, les projections relatives aux pertes économiques engendrées par cet insecte jusqu'en 2020 dépassant 12,5 milliards d'USD. L'invasion de ce coléoptère a également eu de fortes répercussions sur la biodiversité dans les zones touchées, car les frênes constituent une source de nourriture, un abri et un habitat pour de nombreuses espèces. Il a en outre été estimé que l'invasion de l'agrite du frêne et la perte d'arbres qui en résulte peuvent avoir une incidence sur la santé humaine (Donovan *et al.*, 2013). Les stratégies de lutte se sont concentrées sur les mesures de confinement, par exemple en mettant en place des zones de quarantaine, et sur la réduction de la densité des populations, notamment en introduisant des agents de lutte biologique. L'éradication a d'abord été tentée, avant d'être abandonnée (Hermes et McCullough, 2014).

La répartition des frênes constitue la principale limitation de l'aire de répartition de l'agrite du frêne, mais on estime que le climat joue également un rôle important. Dans son aire de répartition d'origine, l'agrite du frêne n'est présent que dans une fraction de l'aire de répartition du frêne, mais d'après la modélisation réalisée par Liang et Fei (2014), les changements climatiques pourraient amener le coléoptère à progresser plus encore vers les

zones septentrionales d'Amérique du Nord, ce qui aurait pour effet d'exposer les frênes de ces régions à un risque durable. En revanche, on estime que dans un scénario de réchauffement climatique, la progression de l'agrile du frêne vers les zones méridionales d'Amérique du Nord devrait être limitée, car ce coléoptère a besoin d'une saisonnalité marquée, avec une longue saison d'hiver. Les travaux menés par Duan *et al.* (2020) sur la survie hivernale de plusieurs larves d'espèces parasitoïdes nuisibles à l'agrile du frêne introduites après un épisode climatique extrême (basses températures hivernales) ont également montré que les phénomènes climatiques extrêmes, associés aux changements climatiques, pourraient réduire l'efficacité de la lutte biologique contre ce coléoptère.

2. Mouches des fruits téphritides (monde entier)

Les téphritides sont une vaste famille d'insectes qui comporte plus de 4 000 espèces décrites. La plupart des espèces se nourrissent de végétaux et plusieurs d'entre elles peuvent entraîner des pertes économiques importantes, notamment lorsque leurs larves se développent dans des fruits à forte valeur marchande. Cette famille d'insectes comprend plusieurs espèces envahissantes, comme *Bactrocera oleae* (Figure 7 et Gutierrez *et al.*, 2009), qui puise sa nourriture uniquement dans les oliviers (et quelques espèces sauvages apparentées), *Bactrocera dorsalis*, qui puise sa nourriture dans plusieurs dizaines d'espèces de plantes fruitières, et la mouche méditerranéenne des fruits, *Ceratitis capitata*, qui puise sa nourriture dans un nombre limité de cultures arboricoles.

Les téphritides ont pu étendre leur aire de répartition d'origine en colonisant à la fois des zones voisines et de nouvelles régions en raison de l'expansion de la culture de leurs hôtes, du commerce international et aussi à la faveur des changements climatiques qui leur ont permis de survivre et de se reproduire en hiver dans des habitats auparavant inadaptés aux diverses espèces de cette famille d'insectes. *Bactrocera oleae* est présent en Afrique, en Europe et en Asie et s'est propagé plus récemment en Californie et au Mexique (CABI, 2021c). Néanmoins, Godefroid *et al.* (2015) concluent que les espèces pourraient s'établir dans les régions tempérées du bassin méditerranéen, mais aussi sous les latitudes plus froides du nord de l'Europe, où l'olivier n'est pas encore cultivé.

Bactrocera dorsalis est un organisme nuisible qui suscite de vives inquiétudes dans toute l'Asie du Sud-Est, mais aussi plus à l'ouest jusqu'au Pakistan ainsi que vers le nord au Népal et dans le sud de la Chine. Il a été signalé dans d'autres régions, notamment dans la majeure partie de l'Afrique, dans l'est des États-Unis d'Amérique et dans plusieurs îles du Pacifique (OEPP, 2021c). Étant donné qu'il possède une large gamme d'hôtes, il est souvent intercepté sur les marchés internationaux. Dans la mesure où les aires de répartition de *B. dorsalis* se situent principalement dans les zones tropicales et subtropicales et que ses besoins sont considérés comme relativement complexes, le risque de pertes économiques directes liées à une incursion dans les régions tempérées est faible. Néanmoins, les changements climatiques induits par le réchauffement planétaire pourraient favoriser un accroissement rapide des populations de mouches pendant la saison douce, en leur permettant de passer l'hiver à l'abri dans des fruits stockés dans des entrepôts (OEPP, 2021c). C'est également le cas de *C. capitata*, présent en Europe centrale et méridionale, dans la plupart des pays d'Afrique et du Proche-Orient, en Amérique centrale et du Sud, ainsi que dans l'ouest de l'Australie, à la différence qu'il peut passer l'hiver dans des régions plus froides sous forme de larve, dans des fruits entreposés dans des locaux chauffés. Enfin, cet organisme nuisible peut se propager via le commerce international d'oranges, de mandarines et de citrons (Fedchok *et al.*, 2006).

3. Charançon rouge du palmier (*Rhynchophorus ferrugineus*) (Proche-Orient, Afrique, Europe)

Le charançon rouge du palmier, *Rhynchophorus ferrugineus*, est l'un des insectes nuisibles aux palmiers les plus dommageables sur le plan économique. Originaire d'Asie du Sud-Est et de Mélanésie, ses larves se nourrissent dans le point de croissance apicale de l'arbre, ce qui endommage considérablement les tissus végétaux, affaiblit la structure de l'arbre et conduit, bien souvent, à la mort de ce dernier. Dans la région du Golfe du Proche-Orient, les pertes annuelles dues à la mort et à l'enlèvement des palmiers gravement infestés par le charançon rouge du palmier ont été estimées entre 5,2 millions et 25,9 millions d'USD, avec un niveau d'infestation correspondant de 1 et 5 pour cent (El-Sabea, Faleiro et Abo-El-Saad, 2009). Selon une autre estimation, les pertes annuelles dues au charançon rouge du palmier s'élèveraient à 15 millions d'USD (Al-Ayedh, 2017).

Le charançon rouge du palmier infeste diverses espèces de palmiers, notamment le cocotier et le palmier dattier (El-Mergawy et Al-Ajlan, 2011; FAO, 2020). Il a été détecté pour la première fois sur des palmiers dattiers au Proche-Orient au milieu des années 1980, et s'est ensuite répandu dans d'autres pays du Proche-Orient, ainsi qu'en Afrique et en Europe. En 2010, il a été détecté en Californie (États-Unis d'Amérique), où il a été déclaré éradiqué en 2015. Sa répartition mondiale a probablement été favorisée par le déplacement de rejets de palmiers en tant que matériel végétal. Les stratégies de lutte comprennent diverses mesures culturales et phytosanitaires, comme l'enlèvement des arbres infestés, la pulvérisation d'insecticides, l'introduction de nématodes entomopathogènes et l'utilisation de pièges à phéromones (FAO, 2020; Ge *et al.*, 2015).

La répartition du charançon rouge du palmier pourrait s'étendre en raison des changements climatiques. D'après les prévisions de Ge *et al.* (2015), les changements climatiques pourraient accroître le nombre de zones hautement propices à la dissémination de cet organisme nuisible en Chine, ce qui aurait pour effet de favoriser l'expansion de cet insecte dans le nord du pays. Parmi les espèces de *Rhynchophorus*, le charançon rouge du palmier est le seul à avoir étendu de manière significative son aire de répartition à partir de son foyer d'origine en Asie du Sud et du Sud-Est (Wattanapongsiri, 1966). Il a été signalé dans 45 pays et, d'après une modélisation des niches écologiques, il pourrait étendre encore davantage son aire de répartition (Fiaboe *et al.*, 2012). Le charançon rouge du palmier est toujours considéré comme la principale menace pour la culture du palmier au Proche-Orient et, malgré tous les moyens de lutte intégrée déployés, il continue à causer de lourdes pertes économiques.

4. Chenille légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*) (Amériques, Afrique, Asie)

La légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*) est un papillon qui appartient à la famille des Noctuidae (figures 7). Sa gamme d'hôtes comprend des centaines d'espèces végétales. Cet organisme nuisible cause de graves dommages aux graminées – en particulier au maïs et au sorgho, ses hôtes de prédilection – ainsi qu'à d'autres cultures, comme le riz, le coton et le soja, prisées par différentes souches de l'espèce. Elle est originaire des régions tropicales et subtropicales des Amériques et, pendant l'été, elle migre vers les régions tempérées du sud et du nord de l'Amérique. Cet organisme nuisible a été signalé pour la première fois en Afrique de l'Ouest en 2016 (Goergen *et al.* 2016), puis dans l'ensemble de l'Afrique subsaharienne et en Égypte en 2019. En 2018, la chenille légionnaire d'automne a été signalée en Inde et s'est rapidement répandue dans toute l'Asie du Sud et de l'Est, notamment en Chine, en République de Corée, au Japon et au Pakistan. Elle a également été signalée au Bangladesh, en

Indonésie, au Myanmar, au Sri Lanka, en Thaïlande, aux Philippines, au Viet Nam et au Yémen (EPP, 2020a). En 2020, elle a été détectée pour la première fois sur du maïs en Jordanie et aux Émirats arabes unis (Secrétariat de la CIPV, 2020a; 2020b) et en Israël (OEPP, 2020b). Elle s'est également répandue sur le continent australien (Secrétariat de la CIPV, 2021).

Adaptée aux climats chauds, la chenille légionnaire d'automne ne connaît pas de phase de diapause, et sa répartition géographique dépend largement des conditions climatiques. Les adultes peuvent parcourir plusieurs kilomètres en une nuit et, lors des migrations saisonnières, ils peuvent atteindre le Canada depuis le sud des États-Unis d'Amérique. Ramirez-Cabral, Kumar et Shabani (2017) ont mis en évidence l'expansion de son aire de répartition dans des régions plus chaudes. Ce phénomène s'explique par plusieurs facteurs: sa capacité d'adaptation à différents environnements, sa grande capacité de dispersion, sa large gamme d'hôtes potentiels et l'intensité du commerce international de marchandises infestées par des larves ou des pupes de ce papillon. Ils anticipent également une réduction, voire une disparition partielle de l'espèce dans l'hémisphère Sud de l'Amérique en raison des conditions météorologiques plus chaudes et plus arides qui devraient prévaloir dans la partie nord du sous-continent au milieu ou à la fin du siècle. Dans l'Union européenne, certaines régions chaudes d'Espagne, d'Italie et de Grèce pourraient procurer des conditions climatiques propices à l'établissement de l'espèce, principalement à partir de populations établies en Afrique du Nord (Jeger *et al.*, 2018).

5. Criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria*) (Afrique et Asie de l'Ouest et du Sud)

On trouve le criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria*) principalement en Afrique, dans la péninsule arabique et en Asie de l'Ouest, voire même dans certaines régions de l'Asie du Sud (FAO, 2021a). Il a aussi été signalé occasionnellement dans le sud-ouest de l'Europe. Le criquet pèlerin se déplace en essaim et se nourrit en dévastant certaines cultures de base, comme le maïs et le sorgho, mais aussi les pâturages et toute autre végétation verte qui se présente sur son passage, ce qui a de lourdes conséquences pour les petits exploitants agricoles et les éleveurs (Kimathi *et al.*, 2020).

Il peut évoluer au fil des générations en fonction des conditions environnementales, passant d'une phase solitaire très féconde et non migratoire à une phase grégaire et migratoire durant laquelle il peut parcourir de longues distances, pour finalement envahir de nouvelles zones. De manière générale, le criquet pèlerin se reproduit largement dans les zones semi-arides, à savoir de l'Afrique de l'Ouest à l'Asie du Sud-Ouest en passant par le Proche-Orient, faisant ainsi peser une menace sur les moyens de subsistance des populations dans plus de 65 pays. Il existe également une sous-espèce beaucoup moins connue, *S. gregaria flaviventris*, présente dans une zone limitée en Afrique australe, et la possibilité pour cette sous-espèce de constituer une menace à l'avenir devrait être étudiée (Meynard *et al.*, 2017).

Les vastes invasions de criquets pèlerins sont répertoriées depuis des siècles, et la FAO tient à jour une base de données statistique de suivi à long terme et à grande échelle concernant les zones touchées. Si l'on veut mettre en œuvre des mesures préventives rentables en temps utile avant que l'organisme nuisible n'inflige des dégâts importants, il est primordial de localiser ses gîtes larvaires potentiels (Kimathi *et al.*, 2020). Depuis les années 1960, les infestations étaient moins fréquentes, mais en 2019-2020, une reproduction acridienne sans précédent a été observée en Érythrée, en Somalie et au Yémen, en raison de précipitations exceptionnellement abondantes dans la Corne de l'Afrique. La stratégie actuellement utilisée pour lutter contre les essaims de criquets pèlerins consiste à effectuer des pulvérisations aériennes de pesticides chimiques, qui ont un fort effet préjudiciable sur l'homme, le bétail, l'environnement et la biodiversité.

Tableau 3 Exemples de possibles effets des changements climatiques sur les organismes nuisibles aux végétaux (insectes, agents pathogènes et adventices) dans différentes zones climatiques

ZONES CLIMATIQUES	POSSIBLES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES FUTURS RISQUES PHYTOSANITAIRES (ESSENTIELLEMENT POUR LA PÉRIODE 2050-2100)	RÉFÉRENCES
Arctiques	Augmentation du risque phytosanitaire dans la toundra	Revich, Tokarevich et Parkinson, 2012.
Boréales	Augmentation du risque d'apparition d'insectes nuisibles et de phytopathologies dans les forêts boréales	Seidl <i>et al.</i> , 2017.
Tempérées	Augmentation du risque phytosanitaire lié aux insectes nuisibles dans l'agriculture et la sylviculture	Grünig <i>et al.</i> , 2020.
	Augmentation du risque d'apparition d'insectes nuisibles et de phytopathologies dans les forêts	Seidl <i>et al.</i> , 2017.
	Augmentation du risque de maladie dans l'agriculture et l'horticulture (prévision basée essentiellement sur des études effectuées en Europe occidentale)	Juroszek et von Tiedemann, 2015; Miedaner et Juroszek, 2021a.
	Accroissement du déplacement vers les pôles des risques liés aux insectes nuisibles et aux agents pathogènes dans différents écosystèmes aménagés et non aménagés.	Bebber, Ramotowski et Gurr, 2013.
	Expansion de plus en plus fréquente de l'aire de répartition d'insectes nuisibles constituant un danger pour l'agriculture et l'horticulture	Choudhary, Kumari et Fand, 2019.
	Augmentation du risque de présence d'adventices dans différents écosystèmes aménagés et non aménagés	Clements, DiTommaso et Hyvönen, 2014.
Subtropicales	Saturation croissante du risque phytosanitaire lié aux insectes nuisibles dans l'agriculture et la sylviculture en Europe du Sud	Grünig <i>et al.</i> , 2020.
	Augmentation du risque de maladie dans l'agriculture et l'horticulture	Gullino <i>et al.</i> , 2018.
	Expansion de plus en plus fréquente de l'aire de répartition d'insectes nuisibles constituant une menace pour l'agriculture et l'horticulture	Choudhary, Kumari et Fand, 2019.
Tropicales	Les insectes seront souvent exposés à des températures trop élevées à l'avenir, ce qui entraînera vraisemblablement une diminution du risque phytosanitaire.	Deutsch <i>et al.</i> , 2008.
	Diminution du risque de maladie dans l'agriculture et l'horticulture (prévision basée sur des simulations effectuées au Brésil), mais aussi augmentation du risque de maladie (prévision basée sur des simulations et des avis d'experts) (les résultats varient en fonction du lieu).	Angelotti <i>et al.</i> , 2017; Ghini <i>et al.</i> , 2011; Juroszek et von Tiedemann, 2015.

N.B.: Les informations présentées dans le tableau sont tirées de références (exemples) qui analysent ou résument plusieurs, voire de nombreux, résultats au sein d'une discipline ou dans plusieurs disciplines. La plupart des résultats portent sur l'hémisphère Nord, en particulier ses régions tempérées. En Inde, une hausse des risques phytosanitaires liés aux insectes nuisibles a déjà été observée, mais sans discrimination entre les zones climatiques (Rathee et Dalal, 2018, par exemple).

Figure 7

A



B



Spodoptera frugiperda, chenille légionnaire d'automne
(Lepidoptera: Noctuidae)

a) Épi de maïs endommagé par des larves;

b) Larve dans un pied de maïs et dommages causés au stade du verticille.

Source: OEPP (2020b), mis gracieusement à disposition par B.R. Wiseman, Service de recherche agricole du Département de l'agriculture des États-Unis, Tifton (États-Unis d'Amérique)

Le comportement, l'écologie et la physiologie du criquet pèlerin évoluent en fonction des conditions climatiques. Il est difficile d'isoler un aspect spécifique des changements climatiques pour expliquer ces évolutions. En revanche, différents aspects comme la hausse des températures et des précipitations dans les zones désertiques, ainsi que les vents violents associés aux cyclones tropicaux, créent un environnement favorable à la reproduction, au développement et à la migration des organismes nuisibles. On peut donc penser que le réchauffement climatique joue un rôle dans la mise en place des conditions nécessaires au développement, à la prolifération et à la survie du criquet pèlerin. Mais les effets des changements climatiques demeurent un phénomène complexe à élucider. Ainsi, la Commission de la FAO de lutte contre le criquet pèlerin en Asie du Sud-Ouest (FAO, 2021a) a souligné la nécessité d'instaurer une coopération internationale entre les pays concernés pour lutter contre la menace acridienne. Les itinéraires que le criquet pèlerin sera amené à emprunter dépendront de la direction et de la vitesse du vent, ainsi que d'autres paramètres météorologiques. Ainsi, les changements climatiques pourraient avoir un impact sur les futures routes de migration de cet organisme nuisible. Mais pour prédire le risque selon différents scénarios de changement climatique, il peut être nécessaire d'opérer une distinction entre les différentes sous-espèces, car chacune peut avoir ses propres besoins en matière de niche.

Agents pathogènes nuisibles aux végétaux

6. Rouille du caféier (*Hemileia vastatrix*) (Afrique, Asie, Amérique latine)

La rouille du caféier, causée par *Hemileia vastatrix*, est l'un des principaux facteurs de limitation de la production de café arabica dans le monde. Ces dernières années, plusieurs flambées précoces et très agressives de la maladie ont causé de graves pertes (jusqu'à 50 à 60 pour cent de pertes de rendement) dans certains pays d'Amérique latine, comme la Colombie et le Mexique.

Le climat semble jouer un rôle dans la prévalence de la maladie. L'un des facteurs qui a favorisé l'apparition des épidémies de rouille en Amérique centrale a été la diminution de l'amplitude thermique diurne, réduisant ainsi la période de latence de la maladie (Avelino *et al.*, 2015). Cette réduction de la période de latence favorise l'augmentation rapide de la population de l'agent pathogène. De même, la période d'incubation de l'agent pathogène peut être réduite en raison du réchauffement climatique. L'analyse réalisée par Ghini *et al.* (2011) sur les futurs scénarios de changement climatique au Brésil ont fait apparaître une tendance à la réduction de la période d'incubation de *H. vastatrix*, ce qui signifie que davantage de générations de ce pathogène pourraient se développer au cours d'une même saison de végétation. Par conséquent, le risque d'épidémie de rouille du caféier pourrait augmenter à l'avenir, à moins que certains d'autres facteurs n'évoluent pour atténuer le risque de maladie, par exemple une diminution de la capacité de l'agent pathogène à infecter les plants de café. Des hivers plus doux peuvent avoir pour effet d'accroître la quantité d'inoculum, facilitant ainsi les infections par l'agent pathogène (Avelino *et al.*, 2015), mais les températures froides ne constituent pas nécessairement un problème pour l'agent pathogène. Par exemple, en Afrique, le déplacement de la production de café vers des régions plus fraîches et plus élevées n'a pas limité l'apparition de la rouille du caféier, car la maladie était déjà répandue (Iscaro, 2014) et peut s'adapter à différents climats (Avelino *et al.*, 2015). Ainsi, la rouille du caféier demeure l'un des principaux fléaux pour la production mondiale de café, et de nouvelles stratégies devront être élaborées afin de lutter contre cette maladie, en particulier si l'influence des changements climatiques sur la biologie de l'agent pathogène décrite dans les études susmentionnées devait se confirmer.

7. Fusariose du bananier (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) TR4 (Australie, Mozambique, Colombie, Asie, Proche-Orient)

Fusarium oxysporum f. sp. *cubense* est un champignon qui vit dans le sol et qui provoque le flétrissement fusarien du bananier. Pour remédier aux dégâts causés par la race 1 de l'agent pathogène, il a été décidé de planter le cultivar résistant «Cavendish» (Ploetz, 2005; Stover, 1986). Mais une nouvelle souche de *F. oxysporum*, la race tropicale 4 (TR4), qui attaque les clones de «Cavendish» sous les tropiques, a été détectée en 1990 en Asie de l'Est, dans certaines régions d'Asie du Sud-Est et dans le nord de l'Australie (Ploetz, 2005; Ploetz et Pegg, 2000). Depuis 2010, cette race s'est propagée à plusieurs pays d'Asie du Sud et du Sud-Est (Inde, République démocratique populaire lao, Myanmar, Pakistan et Viet Nam), au Proche-Orient (Israël, Jordanie, Liban et Oman), en Afrique (Mozambique) (Dita et al., 2018) et en Amérique du Sud (Colombie) (García-Bastidas et al., 2019). Cette maladie constitue une grave menace pour les producteurs de bananes Cavendish du monde entier, indépendamment de la taille des exploitations (Mostert et al., 2017). La hausse des températures, par exemple lorsqu'elles passent de 24 à 34 °C, et les phénomènes environnementaux extrêmes, comme les cyclones et les tempêtes tropicales, peuvent accroître le risque de propagation de la maladie, notamment lorsque les bananiers Cavendish voient leur sol saturé d'eau (Pegg et al., 2019; Peng, Sivasithamparam et Turner, 1999). Étant donné qu'il n'existe à ce jour aucun cultivar de bananier résistant à la TR4 et que la lutte chimique contre l'agent pathogène s'avère inefficace, les mesures préventives demeurent la seule solution pour gérer le risque de fusariose du bananier. Parmi ces mesures figurent notamment l'utilisation de matériel végétal de banane Cavendish sain, la détection précoce des végétaux malades et la destruction de ces derniers dès l'apparition de symptômes de fusariose (Pegg et al., 2019).

8. *Xylella fastidiosa* (Amériques, Europe du Sud, Proche-Orient)

Xylella fastidiosa – bactérie à Gram négatif limitée au xylème – provoque des maladies dans plusieurs cultures importantes sur le plan économique, comme la vigne, les agrumes, l'olive, l'amande, la pêche et le café, mais aussi dans les plantes ornementales et forestières (Janse et Obradovic, 2010; Wells et al., 1987). Elle a été signalée en Amérique du Nord et du Sud ainsi qu'en Asie dans les années 1980 (Cornara et al., 2019). En 2013, *X. fastidiosa* subsp. *pauca* a été signalée sur des oliviers dans le sud de l'Italie, causant de graves pertes et modifiant profondément le paysage typique de la région en détruisant des oliviers centenaires (Saponari et al., 2013). *X. fastidiosa* est transmise par de nombreuses espèces d'insectes sauteurs suceurs de sève, notamment les cercopes et les cicadelles, qui appartiennent principalement aux familles des Aphrophoridae et des Cicadellidae (Almeida et al., 2005; Cornara et al., 2019).

Les modélisations de répartition bioclimatique de l'espèce montrent que *X. fastidiosa* peut potentiellement se répandre au-delà de ses aires de répartition actuelles et atteindre d'autres zones en Italie et dans d'autres pays d'Europe (Bosso et al. 2016; Godefroid et al., 2018). Cette bactérie comporte différentes sous-espèces identifiées, essentiellement *fastidiosa*, *multiplex* et *pauca*. D'après les prévisions issues des modélisations, la sous-espèce *multiplex* et, dans une certaine mesure, la sous-espèce *fastidiosa*, constituent une menace pour la majeure partie de l'Europe, tandis que les zones climatiquement adaptées à la sous-espèce *pauca* sont essentiellement limitées aux pays méditerranéens (Godefroid et al., 2019). Grâce à un modèle prédictif de classement des risques, Frem et al. (2020) ont récemment mis en évidence que le bassin méditerranéen, en particulier le Liban, présente le risque le plus élevé d'établissement et de dissémination de *X. fastidiosa*. Bien que de nombreux pays méditerranéens soient actuellement exempts de *X. fastidiosa*, ils seront exposés dans un avenir proche à un risque élevé d'introduction et d'établissement de la bactérie.

La Turquie est le pays présentant le risque le plus élevé, suivi de la Grèce, du Maroc et de la Tunisie, tous trois classés dans la catégorie des pays à haut risque. Seuls trois pays de la région (Bahreïn, Libye et Yémen) entrent dans le groupe des pays présentant le niveau de risque le plus faible en termes de possible introduction, établissement et dissémination de la bactérie. Mais le risque n'est pas limité à la région méditerranéenne. L'observation de symptômes et des analyses de laboratoire ont montré que *X. fastidiosa* est associée à la brûlure foliaire des amandiers et à la maladie de Pierce sur des vignes dans plusieurs provinces de la République islamique d'Iran (Amanifar *et al.*, 2014), ce qui laisse penser que la bactérie va commencer à se disséminer dans les pays voisins du Proche-Orient.

D'après les prévisions de Bosso *et al.* (2016), les changements climatiques n'aggraveront pas à l'avenir le risque lié à *X. fastidiosa* dans la majeure partie de la région méditerranéenne, mais il convient néanmoins de ne pas perdre de vue la relation «plante hôte-vecteur-bactérie» dans son ensemble lors de la prédiction des risques. Toutefois, il est probable que la performance du vecteur diminue sous l'effet de températures trop élevées et d'un taux d'humidité insuffisant, comme l'ont récemment montré les simulations réalisées par Godefroid *et al.* (2020).

La lutte contre *X. fastidiosa* nécessitera l'élaboration de stratégies efficaces de lutte intégrée contre les organismes nuisibles, notamment l'amélioration de la détection de l'agent pathogène et des insectes vecteurs, des pratiques agricoles et, enfin et surtout, des traitements de quarantaine pour maîtriser la dissémination de l'agent pathogène.

9. Oomycètes, notamment *Phytophthora infestans* et *Plasmopara viticola* (monde entier)

Le déplacement potentiel des oomycètes vers les pôles en raison des changements climatiques risque de poser un problème phytosanitaire, notamment dans l'hémisphère nord (Bebber, Ramotowski et Gurr, 2013). *Phytophthora infestans*, l'oomycète à l'origine du mildiou de la pomme de terre et de la tomate, dispose d'une grande capacité d'adaptation, ce qui constitue un facteur important dans le risque d'apparition de graves épidémies à l'avenir. En effet, plusieurs études laissent entrevoir un risque croissant d'incidence de *P. infestans* dans plusieurs pays (Hannukkala *et al.*, 2007; Perez *et al.*, 2010; Skelsey *et al.*, 2016; Sparks *et al.*, 2014), ce qui exige la mise au point de nouvelles stratégies pour lutter contre la maladie et réduire son impact sur la sécurité alimentaire, par exemple le report du début de la saison de culture de la pomme de terre (Skelsey *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2020).

Des études menées en Égypte sur les effets des changements climatiques sur le mildiou de la tomate et de la pomme de terre ont mis en évidence les répercussions du réchauffement du climat hivernal sur l'incidence de ces deux maladies et les mesures de lutte correspondantes (Fahim, Hassanein et Mostafa, 2003; Fahim *et al.*, 2011). D'après ces études, la survenue d'une épidémie de mildiou de la tomate une à deux semaines plus tôt nécessiterait deux à trois pulvérisations supplémentaires pour pouvoir lutter efficacement contre la maladie. Jusqu'à trois pulvérisations supplémentaires de fongicides seraient donc nécessaires à chaque saison de culture en Égypte au cours des prochaines décennies (2025-2100). En ce qui concerne le mildiou de la pomme de terre, causé par le même agent pathogène, la comparaison des conditions météorologiques et de l'apparition de la maladie au cours de saisons de culture épidémiques et non épidémiques a montré que les saisons hivernales humides et chaudes favorisent les épidémies de mildiou de la pomme de terre en Égypte. Les conditions météorologiques favorables de l'hiver permettent une accumulation de l'inoculum pathogène sur les cultivars précoces au début de la saison de végétation, ce qui favorise l'apparition du mildiou dans les cultures de pommes de terre plantées ultérieurement.

On peut donc s'attendre à ce que les changements climatiques favorisent les épidémies de mildiou à l'avenir. Néanmoins, davantage d'évaluations des effets des changements climatiques sur les maladies des cultures en Égypte et dans d'autres pays du Proche-Orient doivent être réalisées (Fahim *et al.*, 2011).

Le mildiou de la vigne, causé par l'oomycète *Plasmopara viticola*, est une autre maladie grave qui entraîne des pertes de production considérables, allant de 5 à 30-40 pour cent dans la plupart des régions viticoles. En outre, le mildiou altère la qualité du vin elle-même. Comme beaucoup de ces régions jouissent d'un climat tempéré avec des températures peu propices à l'établissement de l'agent pathogène, une hausse de la température de l'air risque de favoriser l'apparition de la maladie. Les études qui se sont appuyées sur des scénarios de changement climatique prévoient donc des épidémies plus précoces qui nécessiteront davantage de traitements pour les éradiquer (Angelotti *et al.*, 2017; Salinari *et al.*, 2006, 2007). Des études à court terme menées dans des phytotrons ont également confirmé une sévérité accrue du mildiou de la vigne dans des conditions simulées de changement climatique (Pugliese, Gullino et Garibaldi, 2010).

10. Fungi producing mycotoxins (global)

De manière générale, les changements climatiques devraient entraîner une recrudescence de mycotoxines dans les cultures, mais la complexité de la flore fongique propre à chaque culture et son interaction avec l'environnement font qu'il est difficile de formuler des conclusions sans mener des études spécifiques. De nombreux résultats d'études sont néanmoins disponibles. Par exemple, les travaux réalisés par Battilani *et al.* (2016) indiquent que le réchauffement climatique pourrait repousser la limite nord du risque lié à la présence d'aflatoxines dans les cultures de maïs en Europe, et Van der Fels-Klerx, Liu et Battilani (2016) ont réalisé des évaluations quantitatives des effets des changements climatiques sur la présence des mycotoxines. Medina *et al.* (2017) ont examiné les effets des changements climatiques sur les champignons mycotoxinogènes, en étudiant l'impact des interactions tripartites entre une concentration élevée de CO_2 (350-400 contre 650-1200 ppm), la hausse des températures (+2 à 5 °C) et le stress causé par la sécheresse sur la croissance et la production de mycotoxines par les principaux champignons responsables de la détérioration des céréales et des fruits à coque, notamment les espèces *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium* et *Penicillium*. Il ressort des simulations de changement climatique que les scénarios envisagés n'ont aucune incidence sur la croissance d'*Aspergillus flavus*, responsable de la production de l'aflatoxine B1. Néanmoins, une stimulation significative de la production d'aflatoxine B1 a été constatée dans des cultures in vitro et in vivo de maïs. En revanche, le comportement d'autres espèces d'*Aspergillus*, responsables de la contamination d'une série de marchandises par l'ochratoxine A, et de *Fusarium verticillioides*, qui produit des fumonisines, laisse penser que certaines espèces sont plus résistantes que d'autres aux changements climatiques, notamment en ce qui concerne la production de mycotoxines.

Outre leurs effets sur ces champignons fréquents, les changements climatiques pourraient également avoir une incidence sur la production de mycotoxines par de nouveaux agents pathogènes, comme le montrent l'augmentation des espèces *Alternaria* et *Myrothecium* observée dans les expériences effectuées par Siciliano *et al.* (2017a, 2017b). Par ailleurs, l'acclimatation des champignons pathogènes mycotoxinogènes aux facteurs climatiques peut entraîner une recrudescence des maladies et éventuellement une contamination des céréales de base et d'autres cultures par les mycotoxines. Par conséquent, la gestion des risques liés aux mycotoxines demeurera un enjeu majeur à l'avenir (Juroszek et von Tiedemann, 2013b), car les changements climatiques pourraient aggraver la situation (Miedaner et Juroszek, 2021b).

Nématodes

11. Nématode des racines (*Pratylenchus coffeae*) (monde entier)

Le nématode des racines, *Pratylenchus coffeae*, est largement répandu dans les vergers d'agrumes à travers le monde. Il infeste principalement les agrumes via les racines nourricières, avec la pénétration des stades mobiles de l'organisme nuisible dans le tissu cortical. De son côté, le tissu vasculaire demeure intact jusqu'à ce qu'il soit finalement envahi par d'autres organismes lors d'une infection secondaire (Duncan, 2009). On sait que le nématode réduit de moitié le poids des racines des agrumes, et des inoculations expérimentales pratiquées sur de jeunes arbres ont révélé des réductions de croissance allant de 49 à 80 pour cent, divisant par trois jusqu'à vingt le nombre de fruits obtenus (O'Bannon et Tomerlin, 1973). Des études récentes sur les changements climatiques en cours en Égypte indiquent que la hausse des températures peut aggraver les dommages causés par le nématode des racines au système racinaire des agrumes, car le taux de reproduction du nématode atteint son niveau maximal lorsque les températures du sol sont relativement élevées (26-30 °C) (Abd-Elgawad, 2020). À ces températures, le cycle de vie s'achève en moins d'un mois et l'agent pathogène peut atteindre des niveaux de densité aussi élevés que 10 000 nématodes/g de racine. Le nématode peut également survivre dans les racines pendant au moins quatre mois. Malheureusement, les porte-greffes commerciaux résistants à ce nématode ne sont pas encore disponibles (Abd-Elgawad, 2020).

12. Nématode du soja (*Heterodera glycines*) (monde entier)

Aux États-Unis d'Amérique et au Canada, le nématode du soja (*Heterodera glycines*) est l'agent pathogène le plus dommageable sur le plan économique pour la culture du soja (*Glycine max*) (Tylka et Marett, 2014). Il entraîne également des pertes de rendement considérables dans de nombreux autres grands pays producteurs de soja, comme l'Argentine, le Brésil et la Chine. Le nématode du soja peut donc potentiellement causer de graves pertes de rendement dans le monde entier.

Le réchauffement climatique risque de favoriser l'expansion de l'aire de répartition du nématode vers le nord (hémisphère nord) et vers le sud (hémisphère sud), et d'augmenter le nombre de générations de nématodes par saison de végétation du soja (St-Marseille *et al.*, 2019) jusqu'à ce que des températures supra-optimales pour le nématode soient atteintes.

Les stratégies les plus efficaces pour lutter contre cet organisme nuisible sont l'utilisation de cultivars résistants (Shaibu *et al.*, 2020) et la rotation des cultures (Niblack, 2005). Selon Niblack (2005), la rotation des cultures comprend au moins trois aspects: dans l'idéal, la culture du soja n'est pratiquée qu'une fois tous les cinq ans dans un même champ (bien que le bénéfice de la rotation puisse être réduit en cas de présence d'adventices pouvant servir d'hôtes de rechange à l'organisme nuisible); l'utilisation de plantes cultivées non hôtes, notamment des cultures de couverture ou des cultures dérobées lors de rotations longues; et la plantation de différents cultivars de soja résistants ou tolérants dans un même champ en alternant les années, afin de réduire au minimum le potentiel d'adaptation des populations de nématodes.

13. Nématode du pin (*Bursaphelenchus xylophilus*) (Amérique du Nord et Asie orientale)

D'après Jones *et al.* (2013), le nématode du pin, *B. xylophilus*, est originaire d'Amérique du Nord, où il infeste les pins (espèce *Pinus*) sans les endommager sérieusement. Mais en dehors de son environnement d'origine, notamment en Asie (Chine, République de Corée, Japon et autres) et en Europe (quelques occurrences au Portugal et en Espagne), cet organisme nuisible cause de graves dommages et tue des millions de pins. Le nématode est véhiculé par le stade adulte des coléoptères *Monochamus*, qui volent entre les pins et peuvent parcourir de longues distances. D'après les projections, le réchauffement climatique favorisera de plus en plus le développement de la maladie du dépérissement du pin, car la hausse des températures facilitera la prolifération des coléoptères *Monochamus* et de nombreux autres insectes forestiers (Seidl *et al.*, 2017), en particulier dans les régions tempérées (Ikegami et Jenkins, 2018). Plusieurs évaluations des risques indiquent que la hausse des températures dans les régions tempérées va accroître la mortalité des conifères. Dans la région méditerranéenne, qui est la zone la plus menacée d'Europe, une mortalité élevée des conifères aurait de graves conséquences environnementales.

Adventices

14. Arbre aux papillons (*Buddleja davidii*) (monde entier)

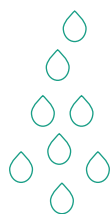
L'aire de répartition de l'adventice envahissante *Buddleja davidii* en Europe, en Amérique du Nord et en Nouvelle-Zélande devrait s'étendre d'ici la fin du XXI^e siècle, car ses limitations de croissance dues au froid sont réduites (Kriticos *et al.*, 2011). En revanche, son aire de répartition en Afrique, en Asie, en Amérique du Sud et en Australie devrait se réduire en raison de l'augmentation du stress dû à la chaleur. Dans l'ensemble, la superficie des terres présentant des conditions de croissance appropriées pour les adventices devrait diminuer de 11 pour cent en moyenne (8, 10 ou 16 pour cent, selon le scénario de changement climatique utilisé). L'une des stratégies d'adaptation possibles consiste à identifier les zones où le risque d'invasion augmente ou diminue, de manière à mobiliser judicieusement les moyens de lutte en vue de réduire la dissémination de l'adventice (Kriticos *et al.*, 2011).

15. Stipe à feuilles dentées (*Nassella trichotoma*) (monde entier)

Les conditions climatiques actuelles offrent à la graminée adventice *Nassella trichotoma* un potentiel de dissémination considérable. À l'avenir, ces possibilités de dissémination dans de nouvelles zones adaptées perdureront, même si l'on prévoit d'ici la fin du XXI^e siècle une réduction de 20 à 27 pour cent de leur superficie totale (selon le scénario de changement climatique retenu), essentiellement en raison de la hausse prévue du stress dû à la chaleur (Watt *et al.*, 2011). Les stratégies de lutte possibles comprennent notamment l'identification des zones à fort risque d'invasion, l'application de mesures visant à réduire la dispersion anthropique des semences et l'application de mesures de désherbage visant à réduire la dispersion des semences par le vent (Watt *et al.*, 2011).

Prévention, atténuation et adaptation





La présente section passe en revue les mesures permettant de prévenir et d'atténuer les effets potentiels des changements climatiques sur les organismes nuisibles, et donc sur la santé des végétaux, et de s'y adapter. Compte tenu des relations d'interdépendance entre les écosystèmes végétaux, on trouvera dans la présente section des informations sur les espèces d'organismes nuisibles et d'autres espèces (par exemple les espèces bénéfiques ou sans impact économique connu) présentes dans l'agriculture, l'horticulture, la sylviculture et les habitats non aménagés, et ce pour deux raisons principales (Juroszek et von Tiedemann, 2013a). Premièrement, il convient d'adopter une approche interdisciplinaire en matière de lutte contre les organismes nuisibles et les maladies, car les connaissances acquises dans les différentes disciplines peuvent être complémentaires et devraient donc être partagées et utilisées dans les diverses disciplines (Jactel *et al.*, 2020; Wilkinson *et al.*, 2011). Deuxièmement, de nombreuses espèces d'organismes nuisibles, en particulier les espèces généralistes mobiles et celles qui ne sont pas limitées à un certain type d'habitat, vivent dans des écosystèmes aussi bien aménagés que non aménagés. Les approches interdisciplinaires sont particulièrement importantes dans les cas où les espèces d'organismes nuisibles modifient leur gamme d'hôtes lorsqu'elles passent d'un écosystème non aménagé à un écosystème aménagé, entraînant ainsi l'apparition de nouvelles espèces d'organismes nuisibles dans une culture ou vice versa (Jones, 2016).

Mesures préventives

La meilleure façon de prévenir et de limiter la dissémination des organismes nuisibles dans le monde causée par le commerce et les déplacements de voyageurs est de réglementer leur circulation par l'application de mesures phytosanitaires et de veiller à ce que les bonnes pratiques agricoles soient appliquées de manière à réduire au minimum leur incidence.

Aspects réglementaires

D'après Carvajal-Yepes *et al.* (2019) et Giovani *et al.* (2020), la réglementation phytosanitaire des importations est le premier rempart contre la dissémination des organismes nuisibles à l'échelle internationale. Un système phytosanitaire de réglementation des importations a pour objectif d'empêcher ou de limiter l'introduction d'organismes nuisibles réglementés avec des marchandises importées, d'autres articles réglementés et des voyageurs. Un système phytosanitaire de réglementation des importations se compose généralement de deux éléments: un cadre réglementaire de législation, de réglementation et de méthodes phytosanitaires; et un service officiel, l'organisation nationale de la protection des végétaux (ONPV), chargé de faire fonctionner ou de superviser le système (NIMP n° 20, 2019). L'ONPV doit assumer plusieurs responsabilités dans le fonctionnement du système phytosanitaire de réglementation des importations. Certaines d'entre elles sont définies à l'article IV.2 de la CIPV (Secrétariat de la CIPV, 1997). Les responsabilités en matière d'importation comprennent, entre autres, la surveillance, l'inspection, la conduite d'ARP, ainsi que la formation et la valorisation des ressources humaines.

Afin d'assurer l'efficacité du système phytosanitaire de réglementation des importations dans le contexte des changements climatiques, il sera d'autant plus important de disposer de bonnes capacités d'évaluation des risques et de les appliquer afin d'évaluer les scénarios

de risques potentiels, en tenant compte des changements climatiques. La mise en place d'activités de surveillance et de suivi opérationnelles et bien organisées sera également primordiale. Les services officiels devront effectuer leurs enquêtes et activités de suivi en redoublant de vigilance afin de détecter rapidement les nouvelles introductions d'organismes nuisibles (notamment celles dues à l'évolution des conditions climatiques) et les changements de statut des organismes nuisibles concernés, et de pouvoir réagir au plus vite (Carvajal-Yepes *et al.*, 2019; Lopian, 2018; Giovani *et al.*, 2020; STDF/Banque mondiale, 2011).

Analyse du risque phytosanitaire

La pierre angulaire de tout système phytosanitaire de réglementation des importations efficace est la réalisation d'une ARP par l'ONPV. L'ARP fournit à l'ONPV les éléments permettant de justifier les mesures phytosanitaires destinées à empêcher l'introduction d'organismes nuisibles, en évaluant les données scientifiques afin de déterminer si un organisme est nuisible (NIMP n° 2, 2019). L'ARP évalue la probabilité d'introduction et de dissémination de l'organisme concerné, et l'ampleur des conséquences économiques potentielles dans une zone déterminée, sur la base de données biologiques, ou autres données scientifiques et économiques. Elle peut permettre de déterminer les éventuelles options de lutte susceptibles de ramener le risque à un niveau acceptable. Elle peut aussi être utilisée pour mettre en place une réglementation phytosanitaire. L'ARP prend également en compte les marchandises provenant d'un lieu d'origine particulier et les risques qui leur sont associés. Une série de normes relatives à l'ARP que les pays peuvent utiliser dans différentes situations a été établie sous les auspices du Secrétariat de la CIPV³.

Dans la mesure où les changements climatiques influent sur la biologie et l'épidémiologie des organismes nuisibles, les activités d'ARP devront être renforcées aux niveaux national, régional et international, et les paramètres liés aux changements climatiques devront être intégrés dans l'évaluation des risques phytosanitaires (Lopian, 2018). L'introduction et la dissémination d'organismes envahissants extrêmement nuisibles ne peuvent être évitées que si les ONPV sont conscientes des risques, et c'est essentiellement l'ARP qui permet de prendre conscience de ces risques. Dans ce contexte, les effets des changements climatiques doivent être dûment pris en compte dans la méthodologie et le processus d'ARP pour permettre aux personnes chargées d'évaluer les risques de les analyser correctement et de proposer des mesures d'atténuation.

Surveillance et suivi

L'une des activités fondamentales des ONPV est d'assurer la surveillance et le suivi des organismes nuisibles, ce qui leur permet de détecter rapidement les organismes nuisibles nouvellement introduits et, par conséquent, de prendre immédiatement des mesures de lutte et d'éradication. En général, plus un organisme nuisible est détecté rapidement après son introduction, plus les chances de l'éradiquer sont grandes. Ainsi, l'une des principales composantes de toute stratégie visant à lutter contre les dangers liés à l'introduction d'organismes nuisibles dans le contexte des changements climatiques doit être la surveillance et le suivi (FAO, 2008) afin de pouvoir détecter les nouvelles introductions d'organismes nuisibles. Il n'est donc pas surprenant qu'une grande partie du travail effectué sous les auspices du Secrétariat de la CIPV ait porté sur la surveillance et la détection, avec notamment l'établissement de la NIMP n° 6 (2018), la publication d'un guide sur la

³ Les normes internationales pour les mesures phytosanitaires adoptées par la CIPV peuvent être consultées à l'adresse www.ippc.int/fr/core-activities/standards-setting/ispm.

surveillance (Secrétariat de la CIPV, 2016) et la mise au point d'une série de protocoles de diagnostic permettant de détecter et d'identifier les organismes nuisibles et les maladies.

Les aléas climatiques engendrés par les changements climatiques amèneront les services officiels à revoir en profondeur la conception et la mise en œuvre des programmes de surveillance et de suivi. Selon la NIMP n° 6 (Surveillance), la compatibilité de l'organisme nuisible avec le climat et d'autres conditions écologiques de la zone concernée est l'un des facteurs qui permettent de déterminer les sites à surveiller. Néanmoins, de nombreuses inconnues subsistent quant aux conditions climatiques propices à l'établissement de différentes espèces. Les effets des changements climatiques sur la répartition des espèces ne sont pas encore bien connus, tandis que les effets des changements climatiques sur les microclimats et les espèces qu'ils abritent font actuellement l'objet de discussions et d'études. Si certaines études indiquent que les microclimats peuvent permettre de lutter contre l'extinction des espèces en créant ce que l'on appelle des «microrefuges» (Suggitt *et al.*, 2018), on s'accorde également à dire que l'état des connaissances sur les effets des changements climatiques sur les microclimats et leur écologie demeure insuffisant et que des recherches supplémentaires doivent être menées afin de déterminer plus précisément les futures conditions climatiques auxquelles seront soumis les organismes dans les microclimats (Maclean, 2020). Les futurs programmes de surveillance et de suivi devront tenir compte des conclusions de ces recherches. Les activités de surveillance ne se limitent toutefois pas aux prospections officielles. Le recours à la «science citoyenne» pour détecter les nouvelles menaces phytosanitaires constitue une piste prometteuse qui mérite d'être examinée plus avant.

Coopération internationale et échange d'informations

Les changements climatiques vont avoir pour effet de déplacer les zones agro-climatiques (King *et al.*, 2018). Ce phénomène créera probablement de nouveaux flux commerciaux qui permettront de fournir des produits agricoles aux pays qui en sont actuellement le plus dépourvus. Si la production végétale d'espèces spécifiques se déplace en raison de l'évolution du climat, les routes commerciales de ces espèces changeront elles-aussi (Lopian, 2018). En outre, le GIEC prévoit que les changements climatiques entraîneront une augmentation du commerce agricole international, aussi bien en termes de volume que de valeur (GIEC, 2014b).

Le déplacement des zones de production agricole, l'évolution des flux commerciaux et l'augmentation du volume du commerce agricole international qui en résulte, associés aux connaissances limitées sur le comportement des organismes nuisibles dans les nouvelles conditions climatiques et écosystémiques, entraîneront un déficit d'informations fiables et scientifiquement vérifiables sur lesquelles les responsables de l'évaluation des risques et les organismes de réglementation pourront fonder leurs évaluations et leurs mesures d'atténuation. Cette lacune pourrait être comblée par la mise en place d'un réseau international d'échange d'informations fiable, destiné à fournir aux administrations compétentes des informations sur la présence d'organismes nuisibles et d'éventuelles filières. Néanmoins, bien que le Secrétariat de la CIPV ait pour mission de faciliter l'échange d'informations, les activités entreprises en la matière demeurent extrêmement limitées et se résument généralement à la publication de rapports établis par les parties contractantes. Il reste donc encore beaucoup à faire pour améliorer l'échange d'informations au niveau international.

Pratiques préventives de lutte contre les organismes nuisibles

Les bonnes pratiques en matière de lutte contre les organismes nuisibles comprennent notamment la production de semences et de matériel végétal propres, les alertes rapides, le fait de disposer d'outils de diagnostic adaptés et de traitements efficaces, comme pour la désinfection des semences (Gullino, Gilardi et Garibaldi, 2014b; Gullino et Munkvold, 2014; Munkvold, 2009; Munkvold et Gullino, 2020; Thomas *et al.*, 2017), ainsi que les techniques d'échantillonnage et de surveillance correspondantes. Il existe également d'autres bonnes pratiques, comme l'utilisation de cultivars résistants, le cas échéant, l'adoption de pratiques culturales favorisant la santé des végétaux, le recours à des systèmes de lutte intégrée contre les organismes nuisibles, l'application de mesures d'hygiène rigoureuses et l'utilisation de produits biologiques destinés à protéger les cultures. Ces pratiques joueront un rôle de plus en plus important face aux menaces croissantes et changeantes posées par les organismes nuisibles en raison des changements climatiques, et certains ajustements devront probablement être effectués afin de préserver leur efficacité. Par exemple, la rotation des cultures peut attirer des espèces mieux adaptées aux conditions climatiques locales et il pourrait être nécessaire d'accroître la fréquence d'application des fongicides (voir tableau 4).

Dernières avancées technologiques

Les paragraphes qui suivent décrivent une avancée technologique prometteuse – l'utilisation des nanotechnologies – qui illustre la manière dont les nouvelles technologies peuvent être utilisées pour protéger la santé des végétaux. Les nanotechnologies fournissent des outils facilitant le développement de produits innovants et perfectionnés de protection des cultures qui permettent de juguler l'augmentation du risque phytosanitaire, notamment celui engendré par les changements climatiques. Ces produits sont toujours en cours de développement et leur utilisation demeure pour le moment relativement confidentielle. En outre, pour des raisons économiques, leur disponibilité peut être limitée dans les pays à faible revenu, du moins dans l'immédiat. Quoi qu'il en soit, ils donnent une idée de ce qui est potentiellement réalisable. L'amélioration de ces outils revêt une grande importance et jouera un rôle décisif à l'avenir.

Nanofertilisants et pesticides

Au cours des deux dernières décennies, les progrès de la science à l'échelle nanométrique ont suscité un nouvel engouement et impulsé de nouvelles recherches sur les applications et les conséquences des nanotechnologies dans le domaine de l'agriculture durable (Scott, Chen and Cui, 2018). Outre l'utilisation fondatrice des nanofertilisants pour l'agriculture de précision (Raliya *et al.*, 2018), il a été suggéré que les nanotechnologies pourraient potentiellement améliorer l'efficacité et l'innocuité des pesticides. Les pesticides produits par les nanotechnologies peuvent couvrir une grande surface et être appliqués avec précision en fonction de différents facteurs environnementaux, comme la température, le pH, l'humidité, les enzymes et la lumière (Bingna *et al.*, 2018), et sont solubles dans l'eau, ce qui réduit les résidus rejetés dans l'environnement (Zhao *et al.*, 2018). Les premières expériences menées avec des nanoparticules solides composées d'oxydes métalliques, de soufre et de silice se sont révélées efficaces pour lutter contre toute une série d'organismes nuisibles (Goswami *et al.*, 2010).

Tableau 4 Exemples d'hypothèses sur l'influence que pourrait avoir l'évolution de la composition de l'atmosphère et du climat sur certains outils ou stratégies de lutte contre les phytopathologies

STRATÉGIE DE LUTTE	OUTIL	EFFETS ATTENDUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	EFFET POTENTIEL DE L'OUTIL SUR L'ADAPTATION
Évitement	Barrière à l'entrée (quarantaine)	Modification de la dispersion des agents pathogènes (fréquence, abondance, distance, vitesse) sous l'effet du climat.	Possible altération de l'efficacité des pratiques de quarantaine. De nouvelles mesures phytosanitaires, notamment l'utilisation de traitements standard internationaux (CIPV), seront nécessaires.
Préventive	Rotation des cultures	Aucun effet direct. La diversité des systèmes de culture continuera de jouer un rôle important dans la réduction du risque de maladie.	Il sera peut-être nécessaire de cultiver des espèces végétales davantage adaptées aux conditions climatiques locales.
Préventive	Gestion des résidus végétaux	Possible augmentation de la biomasse des cultures grâce à l'effet fertilisant du CO ₂ , à moins que les températures élevées et la sécheresse ne viennent neutraliser l'effet fertilisant.	Des approches novatrices doivent être adoptées pour réduire le niveau d'inoculum et la colonisation saprophyte.
Préventive	Date de semis ou de plantation	Des ajustements seront probablement nécessaires. Méthode simple et peu onéreuse pour éviter le stress biotique et abiotique, mais cette méthode peut également présenter des inconvénients.	Cet outil semble très efficace (souvent mentionné dans la littérature).
Préventive	Résistance des plantes hôtes	La résistance liée à la température peut être surmontée par certains agents pathogènes. Les changements dans la morphologie et la physiologie des plantes peuvent avoir une incidence sur la résistance. La possible évolution accélérée des agents pathogènes pourrait éroder prématurément la résistance aux maladies.	Possible altération de l'efficacité de la résistance des plantes hôtes (l'efficacité pourrait être améliorée, identique ou réduite en fonction du gène de résistance [R], de la population d'agents pathogènes, etc.)
Préventive	Nettoyage des machines et des outils	Probablement pas d'effets significatifs.	Les mesures phytosanitaires continueront de jouer un rôle important.
Préventive	Utilisation de semences et de plantules saines	Probablement pas d'effets significatifs.	Les mesures préventives continueront de jouer un rôle important.
Préventive	Niveaux d'intrants (volume d'irrigation, par exemple)	La hausse des températures entraînera vraisemblablement un besoin accru d'irrigation pour davantage de cultures et dans un plus grand nombre de régions.	Les besoins de préservation de l'eau pourraient nécessiter l'utilisation de techniques efficaces comme l'irrigation au goutte-à-goutte, réduisant ainsi le risque de maladies foliaires.
Préventive ou curative	Suivi sur le terrain et utilisation de systèmes d'aide à la décision	Probablement pas d'effets significatifs.	Les systèmes de suivi sur le terrain et d'aide à la décision demeureront importants et leur importance pourrait même augmenter.
Préventive ou curative	Solarisation du sol (couverture du sol, généralement avec une bâche en plastique, pour piéger l'énergie solaire afin de réduire la présence des organismes nuisibles dans le sol)	Le réchauffement climatique pourrait favoriser l'utilisation de cet outil, lequel pourrait s'avérer efficace dans davantage de systèmes et de régions présentant des organismes phytopathogènes. La chaleur pourrait pénétrer plus en profondeur dans le sol et la durée de la période de paillage pourrait être réduite.	L'efficacité sera probablement altérée, mais les effets seront généralement positifs.
Préventive ou curative	Antagonistes, agents de lutte biologique	La vulnérabilité des agents de lutte biologique sera probablement plus élevée en raison des variations climatiques.	L'efficacité pourrait être altérée (améliorée, identique ou réduite en fonction du produit, de l'environnement, du type de gestion mis en place, etc.)
Préventive ou curative	Fongicides de contact	Des précipitations plus fréquentes pourraient nécessiter un plus grand nombre d'applications. De plus, l'accélération ou le ralentissement de la croissance des cultures pourrait raccourcir ou allonger l'intervalle entre deux applications.	L'efficacité pourrait être altérée (améliorée, identique ou réduite en fonction du produit, de l'environnement, du type de gestion mis en place, etc.)
Préventive ou curative	Fongicides systémiques	De plus amples connaissances sur le processus d'absorption foliaire des fongicides systémiques devront être acquises afin d'établir des prédictions fiables. Néanmoins, il est possible que la hausse des températures réduise l'efficacité des fongicides, du simple fait que la croissance des agents pathogènes sera plus forte.	L'efficacité pourrait être altérée (améliorée, identique ou réduite en fonction du produit, de l'environnement, du type de gestion mis en place, etc.)

Source: Adapté à partir des travaux de Juroszek et von Tiedemann (2011).

Plus récemment, les applications des nanotechnologies dans le domaine agricole consistent le plus souvent à encapsuler des herbicides, fongicides ou insecticides connus dans des nanotransporteurs synthétiques composés d'argile, de silice, de lignine ou de polymères naturels, notamment l'alginate, le chitosan et l'éthylcellulose (Diyanat *et al.*, 2019). Le polycaprolactone a été utilisé comme nanotransporteur pour l'herbicide à base de prétilachlore (Diyanat *et al.*, 2019), les herbicides à base de triazine – l'atrazine, l'amétryne et la simazine (Grillo *et al.*, 2012) – et le pesticide avermectine (Su *et al.*, 2020). Le polycaprolactone est très utilisé car il se dégrade naturellement dans l'environnement et aussi parce que sa fabrication est peu onéreuse et ne nécessite pas de plastiques dérivés du pétrole (Sabry et Ragaei, 2018).

Les nanopesticides ont prouvé leur efficacité dans la lutte contre le nématode du pin. Par exemple, l'avermectine nanoencapsulée a démontré son haut niveau de toxicité pour le système gastro-intestinal du nématode, une plus grande capacité de libération prolongée et une meilleure stabilité photolytique par rapport à la traditionnelle application d'avermectine (Su *et al.*, 2020). On a également constaté que la nanoencapsulation de l'atrazine permettait de réduire les effets néfastes de cet herbicide sur l'environnement, sans réduire le taux de mortalité des plantules de *Bidens pilosa* (Preisler *et al.*, 2020). Dans cette dernière étude, l'atrazine nanoencapsulée a eu des effets inhibiteurs de 200 g/ha équivalents à ceux de l'herbicide non encapsulé de 2 000 g/ha, soit une réduction par dix de la concentration d'herbicide. De même, on a constaté dans des plants de moutarde que l'atrazine encapsulée dans du polycaprolactone avec une dilution multipliée par dix était aussi efficace que l'atrazine non diluée et non encapsulée (Oliveira *et al.*, 2015).

Améliorer la génétique pour favoriser la résistance

Les nanotechnologies peuvent également être utilisées dans l'agriculture pour transférer de l'ADN dans les végétaux afin de renforcer leur résistance aux organismes nuisibles (Rai et Ingle, 2012; Sabry et Ragaei, 2018), ce qui permet de réduire l'utilisation de pesticides chimiques potentiellement nocifs pour l'environnement. Il a été proposé d'utiliser des nanoparticules dans le génie génétique végétal pour le transport passif de charges en vue d'éditer le génome à l'aide de nucléases. Cette méthode permettrait de surmonter les difficultés rencontrées dans les méthodes actuelles de transfert de gènes (comme la biolistique et les ultrasons) dues à la barrière physique que constitue la paroi cellulaire rigide et multicouche des végétaux, à l'origine du retard du génie génétique végétal par rapport aux avancées réalisées dans les systèmes animaux (Cunningham *et al.*, 2018). Certaines techniques d'introduction d'ADN dans des cellules animales peuvent être adaptées aux végétaux dans des conditions contrôlées (Chang *et al.*, 2013; Torney *et al.*, 2007).

Cadre d'échange d'informations

En complément du développement de technologies avancées telles que celles décrites ci-dessus, il existe également des initiatives visant à promouvoir le partage des données et des informations. Par exemple, l'initiative MyPestGuide en Australie intègre au sein d'une même plateforme mutualisée le signalement des adventices, des guides pratiques pour l'identification des organismes nuisibles et des outils pour la prise de décision (Wright *et al.*, 2018). Un cadre mondial de partage des données pourrait faciliter la lutte contre les organismes nuisibles qui se disséminent rapidement et qui disposent d'un pouvoir de nuisance potentiellement élevé (Carvajal-Yepes *et al.*, 2019).

Atténuation et adaptation

À quelques exceptions près (Gouache *et al.*, 2011, par exemple), les simulations relatives au risque phytosanitaire n'ont pas intégré les mesures que les agriculteurs et les cultivateurs seraient susceptibles d'adopter en vue d'atténuer une hausse éventuelle de ce type de risque ou de s'y adapter. Cela vaut aussi bien pour l'agriculture (Juroszek et von Tiedemann, 2015) que pour la sylviculture (Bentz et Jönsson, 2015). Néanmoins, il existe dans l'agriculture toute une panoplie de possibles solutions d'atténuation et d'adaptation à court terme qui devraient être envisagées, non seulement par les agriculteurs et les cultivateurs, mais aussi dans les modèles de simulation en vue d'étayer les décisions futures. Le perfectionnement des outils de lutte antiparasitaire fondée sur les mesures d'adaptation augmentera les chances de réussite des stratégies d'adaptation à l'avenir (Macfayden, McDonald et Hill, 2018).

La plupart des scientifiques estiment que l'amélioration de la résistance des plantes hôtes (et la concurrence des plantes cultivées face aux adventices) et l'adaptation de l'application des pesticides constituent les moyens les plus efficaces d'adapter la protection des cultures aux conditions climatiques futures (Juroszek et von Tiedemann, 2015). D'autres solutions existent, notamment les ajustements de la période de semis, l'allongement de la rotation des cultures, l'amélioration des systèmes de prévision des organismes nuisibles, l'ajustement des pratiques agronomiques comme l'irrigation et la fertilisation, et la fourniture de conseils ciblés (Juroszek et von Tiedemann, 2015). Il est intéressant de noter que plusieurs autres mesures potentielles d'adaptation en matière de protection des cultures, comme la modification du microclimat en variant la densité de semis, ne sont pas du tout abordées dans la littérature relative aux simulations du risque phytosanitaire.

Dans les secteurs de la sylviculture et de l'agriculture, il peut également s'avérer nécessaire d'adopter des stratégies climatiquement rationnelles pour lutter contre les organismes nuisibles (Heeb, Jenner et Cook, 2019; Lipper *et al.*, 2014). La lutte intégrée contre les organismes nuisibles comprend généralement un large éventail de mesures directes et indirectes de gestion phytosanitaire (Heeb, Jenner et Cook, 2019; Juroszek et von Tiedemann, 2011). Ces mesures comprennent notamment la quarantaine (biosécurité), d'autres mesures phytosanitaires (par exemple, l'utilisation de semences et de plantules saines), la surveillance attentive et l'optimisation du calendrier des interventions nécessaires (Heeb, Jenner et Cook, 2019; Strand, 2000) ou encore la lutte biologique (Eigenbrode, Davis et Crowder, 2015).

Parmi les différentes possibilités d'adaptation des systèmes de culture aux changements climatiques, la sélection visant à accroître la résistance aux maladies constitue l'une des options les plus prometteuses (Miedaner et Juroszek, 2021a et 2021b). Que ce soit pour assurer la sécurité alimentaire, avec des cultures de base comme le maïs et les haricots, ou pour pérenniser les cultures commerciales destinées à l'exportation, comme le café et le soja, il est essentiel de disposer de variétés résistantes à la sécheresse, aux températures élevées et aux organismes nuisibles. Parfois, de nouvelles variétés permettent d'adapter les systèmes agricoles afin de réduire le risque phytosanitaire associé aux changements susceptibles de se produire. Par exemple, dans le centre du Queensland (Australie), la disponibilité de nouvelles variétés de blé permet de planter les cultures de blé trois à quatre semaines plus tôt que la normale (Howden, Gifford et Meinke, 2010). De même, en ce qui concerne le cacao, il est suggéré d'effectuer une sélection multicritères afin de créer de nouvelles variétés dans le contexte des changements climatiques (Cilas et Bastide, 2020). Si la sélection des cultures, notamment des arbres, prend du temps avant de donner des résultats face aux nouveaux défis, la modélisation des effets des changements climatiques sur le risque phytosanitaire

peut contribuer à éclairer les stratégies et à anticiper de nouveaux problèmes. Il peut également être utile d'identifier, de conserver et d'utiliser les anciennes variétés.

Compte tenu de la difficulté à gérer efficacement les grands arbres adultes, l'adaptation aux effets potentiels des changements climatiques dans la sylviculture passe très souvent par des mesures préventives, comme l'élimination des arbres infestés afin d'éviter la propagation des organismes nuisibles (Bonello *et al.*, 2020; Liebhold et Kean, 2019). L'exploitation de la diversité génétique constitue également une option d'adaptation préventive importante. Lors de la plantation de nouvelles forêts, on peut par exemple choisir des essences d'arbres appropriées, ou bien des clones ou des cultivars résistants ou tolérants aux organismes nuisibles, le cas échéant (Bonello *et al.*, 2020).

Le choix des stratégies d'adaptation dépend de nombreux facteurs, par exemple le coût. Srivastava, Kumar et Aggarwal (2010) concluent que des stratégies d'adaptation à moindre coût, comme changer la date de semis et le type de cultivar, devraient être envisagées afin de réduire la vulnérabilité de la production agricole face aux changements climatiques. L'intérêt de modifier les dates de plantation et de récolte est néanmoins fonction de plusieurs facteurs, comme une éventuelle baisse de rendement, le lieu où la culture est pratiquée, les préférences des agriculteurs et des consommateurs en matière de cultivars et la situation du marché (Wolfe *et al.*, 2008). Il peut également être nécessaire de recourir à des mesures d'adaptation plus onéreuses (Juroszek et von Tiedemann, 2011). Par exemple, la mise au point de méthodes de lutte plus efficaces contre les agents pathogènes présents dans les résidus de culture. Ces méthodes peuvent être combinées à des pratiques déjà bien établies, comme la rotation des cultures, afin d'éviter la colonisation saprophyte des résidus de culture par des agents pathogènes et de réduire le transfert d'inoculum d'une saison culturale à l'autre (Melloy *et al.*, 2010). Les méthodes « ancestrales », comme le labour, peuvent également constituer un moyen efficace pour se débarrasser des résidus de cultures malades (Miedaner et Juroszek, 2021b), même si l'agriculture de conservation est probablement plus adaptée dans les zones sujettes à la sécheresse. Quant au labourage, il nécessite davantage de carburant et entraîne donc plus d'émissions de CO₂ que le labour léger.

Enfin, lors de la planification stratégique, il est important de déterminer où faire pousser des cultures agricoles pérennes telles que les palmiers dattiers (Shabani et Kumar, 2013). Savoir où les phytopathologies ayant un impact économique pourraient apparaître à l'avenir permet de déterminer les zones à faible risque afin d'éviter ou de réduire au minimum l'impact futur de ces maladies (Shabani et Kumar, 2013). Comme expliqué plus haut, cela vaut également pour la sylviculture, où la planification est particulièrement importante afin de prévenir ou de réduire au minimum la hausse des futurs risques phytosanitaires. S'agissant des cultures annuelles telles que le colza, le déplacement des zones de culture a été suggéré comme une adaptation possible en cas de scénario catastrophe (Butterworth *et al.*, 2010). Par exemple, en Égypte, la culture des fèves a été déplacée du centre du pays vers la région plus fraîche du delta du Nil, dans le nord, afin d'échapper aux effets néfastes des viroses, probablement dues – du moins en partie – au réchauffement climatique.

Toutes les options présentées ci-dessus peuvent permettre aux agriculteurs et aux cultivateurs de limiter les risques phytosanitaires et de s'y adapter. De manière générale, il importera néanmoins de privilégier et mettre en œuvre les technologies et pratiques permettant à la fois d'accroître la productivité et de réduire la vulnérabilité aux changements induits par les émissions ayant une incidence sur le climat, notamment les émissions de CO₂, de N₂O et de CH₄.

Conclusions et recommandations





Au cours des dernières décennies, les travaux de recherche sur la biologie des changements climatiques ont connu un essor considérable, donnant lieu à de nombreuses publications chaque année, en particulier ces dix dernières années (Björkman et Niemelä, 2015; Juroszek *et al.*, 2020; Peterson, Menon et Li, 2010, par exemple). De manière générale, la plupart des études (résumées dans le tableau 5) soulignent que le risque phytosanitaire lié aux insectes, aux agents pathogènes et aux adventices augmentera dans les écosystèmes agricoles sous l'effet des changements climatiques (Choudhary, Kumari et Fand, 2019; Clements, DiTommaso et Hyvönen, 2014; Juroszek *et al.*, 2020), notamment dans les zones actuellement les plus froides, comme les régions arctiques, boréales, tempérées et subtropicales. Les données indiquent que tous les climats seront impactés, mais que la nature et l'ampleur de l'impact varieront en fonction de la capacité des systèmes de production et des écosystèmes naturels à s'adapter et à évoluer. Ce constat vaut aussi en grande partie pour les agents pathogènes et les insectes nuisibles dans le secteur forestier (Seidl *et al.*, 2017).

Des stratégies climatiquement rationnelles pour lutter contre les organismes nuisibles ont été récemment décrites par Heeb, Jenner et Cook (2019). Ces mesures et d'autres mesures préventives et curatives de protection des végétaux devront être adoptées pour permettre aux pays de s'adapter à de nouveaux scénarios climatiques (Almekinders *et al.*, 2019; Erikson et Griffin, 2014; Thomas-Sharma *et al.*, 2016). Mais il faudra également prêter attention aux dispositions réglementaires, aux besoins en matière de recherche, à la coopération internationale et au renforcement des capacités. On trouvera ci-après un certain nombre de recommandations relatives à ces questions.

Élaboration des politiques et réglementation

Adapter l'ARP en fonction des changements climatiques

L'ARP fournit les éléments scientifiques permettant de justifier la mise en place des mesures phytosanitaires, notamment celles élaborées sous les auspices du Secrétariat de la CIPV. Il est proposé que les NIMP relatives à l'ARP soient examinées afin de déterminer si elles sont adaptées aux enjeux associés aux changements climatiques. Les activités d'ARP doivent être renforcées aux niveaux national, régional et international, et les aspects liés aux changements climatiques doivent être inclus dans l'évaluation du risque phytosanitaire.

Surveillance et suivi en lien avec les changements climatiques

Les mesures de surveillance et de suivi sont essentielles pour détecter l'introduction de nouveaux organismes nuisibles ou pour surveiller leur statut. Il est proposé que les NIMP et les directives relatives à la surveillance et au suivi élaborées sous les auspices du Secrétariat de la CIPV soient évaluées afin de déterminer si elles doivent être révisées pour tenir compte des effets des changements climatiques. Les activités de surveillance et de suivi des menaces phytosanitaires aux niveaux national, régional et international doivent être renforcées. Il est proposé d'envisager l'élaboration de modèles de programmes de surveillance multilatérale, notamment dans les pays en développement, afin de déterminer comment de tels programmes peuvent être mis en place pour endiguer les menaces phytosanitaires.

Renforcer l'échange et la communication des informations

L'échange d'informations au niveau international sur les flux commerciaux ainsi que sur les occurrences et les interceptions d'organismes nuisibles est extrêmement important afin de compenser le manque de données issues de la recherche scientifique à propos des effets des changements climatiques sur la santé des végétaux. Il est également primordial de mutualiser les informations sur l'évolution de la répartition des organismes nuisibles et de leurs gammes d'hôtes, ainsi que sur la capacité d'adaptation des organismes nuisibles et des plantes hôtes. Il importe aussi d'améliorer le système de communication de l'information de la CIPV, qui comprend à la fois les notifications officielles émises par les parties contractantes et d'autres informations disponibles et publiées par ailleurs.

Besoins en matière de recherche

Les principales lacunes en matière de recherche sur les changements climatiques et les organismes nuisibles sont présentées dans le tableau 6. Les bailleurs de fonds et les organismes de recherche devraient, dans la mesure du possible, prendre en compte ces lacunes dans leurs programmes de recherche afin d'y apporter des solutions. Une plus grande attention doit notamment être accordée, dans la plupart des zones géographiques, au développement de vastes programmes de recherche multidisciplinaires. Les programmes de recherche devraient porter à la fois sur les besoins des pays industrialisés et sur ceux des pays en développement. Des investissements financiers à long terme devront être réalisés afin d'évaluer les effets des changements climatiques actuels et futurs sur le long terme ainsi que les risques phytosanitaires associés, notamment en testant des méthodes de réduction des risques. Ainsi, quelques «zones sensibles» (zones de production sensibles au climat) devraient être sélectionnées pour y déployer des activités de recherche et de développement à long terme («sites témoins en matière de changements climatiques pour l'ARP et l'essai de méthodes de réduction du risque phytosanitaire»).

En outre, les investissements effectués par les gouvernements nationaux devraient être orientés vers le renforcement des systèmes et structures de surveillance nationaux, comme les laboratoires de diagnostic, afin d'endiguer rapidement d'éventuelles invasions biologiques. Par ailleurs, des unités performantes spécialisées dans l'ARP devraient être établies afin de prévenir les risques phytosanitaires.

Les paragraphes ci-après présentent certaines questions auxquelles davantage de travaux devraient être consacrés.

Études sur les effets des changements climatiques sur les produits phytopharmaceutiques et les stratégies de lutte

De nombreuses lacunes en matière de recherche doivent être comblées dans ce domaine. Il est possible, par exemple, que des organismes nuisibles développent une résistance aux produits phytopharmaceutiques si ces derniers sont plus fréquemment utilisés pour faire face à la prévalence accrue des organismes nuisibles due aux changements climatiques. Des travaux de recherche sur cette question seraient donc utiles. Par ailleurs, les conséquences directes des changements climatiques sur l'efficacité des stratégies de lutte, notamment sur les mesures de lutte chimique ou biologique, n'ont pas été suffisamment étudiées jusqu'à présent (Gilardi *et al.*, 2017, Gullino *et al.*, 2020) et devraient faire l'objet de travaux de recherche beaucoup plus approfondis (tableau 6).

Tableau 5 Exemples d'articles de synthèse récents relatifs aux changements climatiques et aux futurs risques phytosanitaires pour les écosystèmes végétaux dans l'agriculture, l'horticulture, la sylviculture et les habitats naturels non aménagés

GROUPES D'ORGANISMES NUISIBLES	RÉFÉRENCES (CLASSÉES PAR ORDRE CHRONOLOGIQUE DANS CHAQUE GROUPE)
Insectes	Choudhary, Kumari et Fand, 2019; Jactel, Koricheva et Castagnérol, 2019; Kellermann et van Heerwaarden, 2019; Moriyama et Numata, 2019; Yadav, Stow et Dudaniec, 2019; Borkataki <i>et al.</i> , 2020; Debelo, 2020; Frank, 2020; Lehmann <i>et al.</i> , 2020; Marshall, Gotthard et Williams, 2020.
Agents pathogènes	Paraschivu <i>et al.</i> , 2019; Paterson et Lima, 2019; Sharma, Hooda et Goswami, 2019; Singh, Shukla et Singh, 2019; Castillo <i>et al.</i> , 2020; Garrett <i>et al.</i> (2020a); Hunjan et Lore, 2020; Juroszek <i>et al.</i> 2020; Kumar et Khurana, 2020; Mehmood <i>et al.</i> , 2020; Misra <i>et al.</i> , 2020; Perrone <i>et al.</i> , 2020; Priyanka <i>et al.</i> , 2020; Roth <i>et al.</i> , 2020; Trebicki, 2020.
Adventices	Billore, 2019; Manisankar et Ramesh, 2019; Ziska, Blumenthal et Franks, 2019; Karaca et Dursun, 2020; Ruttledge et Chauhan, 2020; Sun <i>et al.</i> , 2020.
Combinaisons de groupes d'organismes nuisibles	Heeb, Jenner et Cock, 2019; Santini et Battisti, 2019; Trebicki et Finlay, 2019; Bajwa <i>et al.</i> , 2020; Bonello <i>et al.</i> , 2020; Jabran, Florentine et Chauhan, 2020; Jactel <i>et al.</i> , 2020.

N.B.: Les exemples cités ont été sélectionnés de manière subjective. Ils ont été publiés entre 2019 et septembre 2020 dans des revues et des livres, et comportent tous des synthèses succinctes. Les articles de synthèse portant sur le même sujet et publiés entre 1988 et 2011 sont compilés dans les travaux de Juroszek et von Tiedemann (2013a).

Tableau 6 Exemples de lacunes dans le domaine de la recherche sur les changements climatiques en lien avec les organismes nuisibles aux végétaux

LACUNES EN MATIÈRE DE RECHERCHE (PROPOSITIONS DE THÈMES DE RECHERCHE)	RÉFÉRENCES
Les opportunités potentielles liées à la protection des cultures ne sont pas suffisamment étudiées	Sutherst <i>et al.</i> , 2007.
Les espèces souterraines sont moins étudiées que les espèces aériennes	Pritchard, 2011.
Les espèces des régions tropicales sont moins étudiées que les espèces des régions subtropicales et tempérées	Ghini, Bettiol et Hamada, 2011.
Les organismes nuisibles présents dans les systèmes non aménagés sont moins étudiés que ceux présents dans les systèmes aménagés	Anderson <i>et al.</i> , 2004.
Les travaux de recherche se limitent à quelques espèces d'organismes nuisibles particulièrement importantes. De nombreuses autres espèces sont moins étudiées, voire pas du tout (par exemple, les bactéries et les virus sont beaucoup moins étudiés que les champignons pathogènes aériens)	Frank, 2020; Jones, 2016.
De nombreuses autres études sont nécessaires pour examiner les interactions entre la température, l'eau et le CO ₂ (simulation des conditions réelles futures, en utilisant par exemple des méthodes d'enrichissement en CO ₂ à l'air libre)	Tenllado et Canto, 2020; Vilà <i>et al.</i> , 2021.
Les interactions biotiques dans les différents niveaux trophiques sont mal connues, notamment les capacités d'adaptation des espèces	Van der Putten, Macel et Visser, 2010.
Il serait utile d'établir un résumé exhaustif des résultats des études déjà réalisées dans les domaines de l'agriculture et de l'horticulture	Juroszek <i>et al.</i> , 2020.
Il serait utile d'évaluer les méthodes actuelles de protection des végétaux au regard des scénarios de changement climatique projetés	Delcour, Spanoghe et Uyttendaele, 2015.
Des ensembles de données à long terme sont nécessaires pour dissocier les effets potentiels des changements climatiques sur les organismes nuisibles et les maladies des facteurs de confusion tels que les modifications apportées à la gestion	Garrett <i>et al.</i> , 2016 et 2021.
Les simulations des futurs risques phytosanitaires devraient être plus souvent corrélées aux modèles de culture afin de fournir des informations sur les pertes de rendement potentielles. De même, les éventuelles mesures d'adaptation et d'atténuation devraient, si possible, être intégrées dans les modélisations	Juroszek et von Tiedemann, 2015.
Il serait utile d'intensifier la recherche sur les mesures d'adaptation et d'atténuation afin de réduire au minimum l'augmentation des risques	Hoffmann <i>et al.</i> , 2019.
Des cadres doivent être établis afin d'adapter les systèmes d'aide à la décision aux modifications de fréquence des conditions météorologiques, voire à des scénarios entièrement nouveaux	Garrett <i>et al.</i> , 2020a.

N.B.: Les références citées ont été sélectionnées de manière subjective, en privilégiant néanmoins les publications postérieures à 2010, afin de démontrer que les lacunes en matière de recherche sont toujours d'actualité. De manière générale, chaque exemple s'applique aussi bien aux insectes nuisibles, qu'aux agents pathogènes et aux adventices. Adapté à partir des travaux de Juroszek et von Tiedemann (2013a) et de Juroszek *et al.* (2020).

Des expériences ont néanmoins été menées et leurs résultats indiquent par exemple que le réchauffement climatique pourrait accroître le risque de voir apparaître des adventices résistantes aux herbicides en raison d'une plus grande détoxification de l'herbicide par l'adventice en fonction de la température (Matzrafi *et al.*, 2016). Il convient également de mener des recherches sur les organismes nuisibles souterrains car la plupart des travaux effectués jusqu'à présent sur les effets potentiels des changements climatiques sur les organismes nuisibles ont surtout porté sur les organismes nuisibles aériens plutôt que sur les organismes nuisibles souterrains, malgré l'importance de ces derniers dans les processus souterrains et leur influence sur la santé des sols (Chakraborty, Pangga et Roper, 2012; Pritchard, 2011).

Études sur les effets des changements climatiques sur les ennemis naturels

Les effets des changements climatiques sur les ennemis et antagonistes naturels et leurs conséquences sur la lutte contre les organismes nuisibles demeurent mal connus (Eigenbrode, Davis et Crowder, 2015). Dans le cas des insectes nuisibles à la vigne, il a été proposé que la lutte future contre ces insectes soit fondée sur un ensemble solide de données recueillies sur le terrain aussi bien en ce qui concerne les organismes nuisibles eux-mêmes que leurs antagonistes dans des conditions de changement climatique (Reineke et Thiéry, 2016). Mieux comprendre les effets des changements climatiques sur les processus écologiques, notamment au niveau local, permettra d'intégrer des principes généraux dans les mesures de lutte (Macfayden, McDonald et Hill, 2018).

Sylviculture et écosystèmes non aménagés

Les organismes nuisibles ont été beaucoup plus étudiés dans le domaine de l'agriculture que dans celui de la sylviculture (Ormsby et Brenton-Rule, 2017), et les recherches sur les écosystèmes non aménagés demeurent rares (Harvell *et al.*, 2002). Cet état de fait met en évidence la nécessité d'instaurer un mécanisme de collaboration multidisciplinaire, de coordination et d'échange des connaissances dans le domaine de la recherche sur la biologie des changements climatiques. Cela permettrait de réunir des scientifiques qui travaillent sur différents biotes au sein d'un même écosystème, par exemple des phytopathologistes et des entomologistes (Jactel *et al.*, 2020), ainsi que des chercheurs qui étudient différents écosystèmes et secteurs, comme l'agriculture, la sylviculture et les écosystèmes non aménagés (par exemple dans le cadre des approches «Santé circulaire» ou «Un monde, une santé»).

Coopération internationale

Il est extrêmement important de promouvoir la coopération internationale afin que les pays puissent adapter efficacement leurs stratégies de lutte antiparasitaire à la réalité des changements climatiques. En effet, lorsqu'un agriculteur ou un pays lutte efficacement contre un organisme nuisible, cela a une incidence sur le succès de la lutte menée contre ce même organisme ailleurs, car les organismes nuisibles ne connaissent pas les frontières. La coopération internationale peut s'effectuer au niveau mondial ou régional. Un nouveau système de surveillance mondiale des maladies des cultures pourrait par exemple regrouper les réseaux de diagnostic, les réseaux de gestion des données, les réseaux d'évaluation des risques et les réseaux de communication (Carvajal-Yepes *et al.*, 2019).

La mise en place d'un mécanisme de coordination mondiale de la recherche dans le domaine phytosanitaire, comme proposé dans le Cadre stratégique de la CIPV pour 2020-2030 (FAO, 2021b), pourrait permettre de renforcer la collaboration scientifique, d'améliorer la coordination des efforts, d'optimiser l'utilisation des ressources et de faciliter l'harmonisation des objectifs. Ce mécanisme pourrait non seulement contribuer à faire progresser

la science, mais aussi à renforcer l'assise scientifique des efforts internationaux destinés à évaluer et à gérer les effets des changements climatiques sur la santé des végétaux, ce qui contribuerait à protéger l'agriculture, l'environnement et les activités commerciales contre les organismes nuisibles.

Au niveau régional, l'analyse des mesures envisagées pour parer aux changements climatiques peut contribuer à éclairer les stratégies visant à adapter la lutte contre les maladies (Garrett *et al.*, 2018). Néanmoins, bien que de nombreuses organisations nationales et régionales de la protection des végétaux s'efforcent de surveiller et d'endiguer les apparitions d'organismes nuisibles aux cultures, de nombreux pays ne communiquent pas suffisamment les informations dont ils disposent, ce qui retarde la mise en place de mesures coordonnées visant à prévenir l'établissement et la dissémination des maladies. L'appui au renforcement des capacités dans ces pays devrait donc être une composante essentielle de la coopération internationale. La création de forums mondiaux pour le partage d'informations, avec le soutien d'organisations internationales, pourrait être extrêmement utile. L'expérience acquise tout au long de la pandémie de covid-19 concernant l'organisation de réunions en ligne permettra de favoriser les contacts et les interactions à distance et représentera également un gain de temps et d'argent considérable.

Renforcement des capacités

Si la covid-19 a bouleversé la plupart des domaines de la vie, y compris les systèmes alimentaires et les systèmes éducatifs, elle a également révélé le potentiel de création de nouveaux programmes partagés en matière de renforcement des capacités, avec notamment le basculement de l'enseignement en ligne. La lutte contre la fracture numérique permettra de favoriser ces nouvelles possibilités de renforcement des capacités en ligne.

Les pays ont à leur disposition plusieurs moyens pour renforcer leur capacité à faire face et à s'adapter aux changements climatiques. Les exemples ci-après décrivent quelques-unes de ces possibilités.

Le Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (CGIAR) – un partenariat mondial de recherche sur la sécurité alimentaire – est en train de mettre en place une nouvelle stratégie appelée «One CGIAR» qui démarrera en 2022, avec pour objectif de déployer plus rapidement, à plus grande échelle et à moindre coût des innovations scientifiques pour les systèmes alimentaires, fonciers et hydriques. Il pourrait être utile de conserver la lutte contre les organismes nuisibles comme l'un des éléments clés de la nouvelle stratégie One CGIAR afin de renforcer les capacités d'adaptation à l'échelle mondiale, notamment pour les programmes nationaux qui continuent de renforcer leurs capacités dans ce domaine. On peut par exemple adopter des approches d'adaptation dites «sans regret», qui visent un renforcement général des systèmes et de leur capacité à répondre aux nouveaux défis posés par les changements climatiques (Heltberg, Siegel et Jorgensen, 2009). L'idée qui sous-tend ce type d'approche est que les systèmes bénéficieront de nombreuses améliorations, quelle que soit l'issue des scénarios actuellement envisagés en matière de changement climatique. Étant donné que les nouvelles introductions d'organismes nuisibles ont souvent une incidence au moins égale à celle des effets des changements climatiques, il est facile de concevoir des améliorations «sans regret» pour les systèmes de lutte contre les organismes nuisibles. Les mesures «sans regret» peuvent avoir leurs limites (Dilling *et al.*, 2015), mais la marge de manœuvre est grande pour améliorer les systèmes de lutte contre les organismes nuisibles et les maladies dans les exploitations agricoles et au niveau régional.

La méthode d'évaluation des capacités phytosanitaires mise au point par la CIPV peut être utilisée pour évaluer la capacité d'un pays à répondre aux défis posés par les phytopathologies (Day, Quinlan et Ogutu, 2006; Secrétariat de la CIPV, 2012). Cette option constitue un autre exemple d'approche «sans regret» pouvant être envisagée, car le renforcement des capacités aura des effets bénéfiques, quelle que soit l'issue des scénarios relatifs aux changements climatiques, et permettra probablement d'améliorer le rapport coût-bénéfice.

Renforcer les capacités d'adaptation aux changements implique également d'identifier les moyens de gérer le risque financier. Ce risque peut parfois être couvert, du moins en partie, par une assurance récolte, laquelle constitue une option intéressante pour préserver les moyens de subsistance des agriculteurs lorsqu'ils sont menacés par les changements climatiques. Néanmoins, ce type d'assurance ne protège pas nécessairement la productivité et peut inciter à poursuivre la production de certaines cultures dans des régions où ces cultures ne sont plus adaptées aux nouvelles conditions environnementales (Falco *et al.*, 2014).

Des éléments d'altruisme effectif («procurer des avantages à la société») – qui consistent à consacrer une partie des efforts à l'évaluation des scénarios les plus pessimistes concernant les effets des organismes nuisibles et la façon d'y remédier – peuvent également s'avérer utiles pour aider les pays à s'adapter aux changements climatiques (Garrett *et al.*, 2020b).

En résumé, les éléments examinés dans le présent rapport indiquent clairement que les changements climatiques entraîneront dans bien des cas une aggravation des problèmes phytosanitaires dans les écosystèmes aménagés (agriculture, horticulture, sylviculture, etc.), semi-aménagés (parcs nationaux, etc.), mais aussi probablement dans les écosystèmes non aménagés. Les changements climatiques récents obligent déjà à modifier les stratégies de protection des végétaux. Et ces ajustements deviendront encore plus indispensables à l'avenir, si les modélisations des changements climatiques réalisées jusqu'à présent devaient se confirmer. Toute lutte climatiquement rationnelle contre les organismes nuisibles implique la mise en œuvre d'approches holistiques dans les exploitations agricoles et les paysages, et repose essentiellement sur l'utilisation de méthodes de lutte existantes en vue d'améliorer l'atténuation et de renforcer la résilience. Face aux changements climatiques, il est primordial de préserver les services et les produits des écosystèmes, aménagés ou non, notamment les denrées alimentaires. Par ailleurs, les mesures préventives et curatives de protection des végétaux sont des facteurs essentiels en vue d'assurer la sécurité alimentaire aujourd'hui et à l'avenir.

Bibliographie

- Abd-Elgawad, M.M.M.** 2020. Managing nematodes in Egyptian citrus orchards. *Bulletin of the National Research Centre*, 44: 41 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00298-9>
- Ainsworth, E.A. et Long, S.P.** 2021. 30 years of free-air carbon enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology*, 27: 27-49.
- Al-Ayedh, H.Y. Al-.** 2017. The current state of the art research and technologies on RPW management. Article présenté lors de la «Consultation scientifique et réunion de haut niveau sur le charançon rouge du palmier», 29-31 mars 2017, Rome, FAO.
- Albajes, R., Gullino, M.L., van Lenteren, J.C. et Elad, Y. (dir. pub.).** 1999. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*. Dordrecht (Pays-Bas), Kluwer Academic Publishers.
- Almeida, R.P.P., Blua, M.J., Lopes, J.R.S. et Purcell, A.H.** 2005. Vector transmission of *Xylella fastidiosa*: Applying fundamental knowledge to generate disease management strategies. *Annals of the Entomological Society of America*, 98: 775-786.
- Almekinders, C.J., Walsh, S., Jacobsen, K.S., Andrade-Piedra, J.L., McEwan, M.A., de Haan, S., Kumar, L. et Staver, C.** 2019. Why interventions in the seed systems of roots, tubers and bananas crops do not reach their full potential. *Food Security*, 11: 23-42.
- Altermatt, F.** 2010. Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277: 1281-1287.
- Altizer, S., Ostfeld, R.S., Johnson, P.T.J., Kutz, S. et Harvell, C.D.** 2013. Climate change and infectious diseases: From evidence to a predictive framework. *Science*, 341: 514-519.
- Amanifar, N., Taghavi, M., Izadpanah, K. et Babaei, G.** 2014. Isolation and pathogenicity of *Xylella fastidiosa* from grapevine and almond in Iran. *Phytopathologia Mediterranea*, 53(2): 318-327.
- Anderegg, W.R.L., Kane, J.M. et Anderegg, L.D.L.** 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*, 3: 30-36.
- Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R. et Daszak, P.** 2004. Emerging infectious diseases of plants: Pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, 19: 535-544.
- Angelotti, F., Hamada, E., Magalhaes, E.E., Ghini, R., Garrido, L.D.R. et Junior, M.J.P.** 2017. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira, Brasília*, 52: 426-434.
- Aukema, J.E., Leung, B., Kovacs, K., Chivers, C., Britton, K.O., Englin, J., Frankel, S.J. et al.** 2011. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States. *PLoS ONE* 6(9): e24587 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024587>
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A.J. et Morales, C.** 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7: 303-321.
- Bairstow, K.A., Clarke, K.L., McGeoch, M.A. et Andrew, N.R.** 2010. Leaf miner and plant galler species richness on Acacia: Relative importance of plant traits and climate. *Oecologia*, 163: 437-448.
- Bajwa, A.A., Farooq, M., Al-Sadi, A.M., Nawaz, A., Jabran, K. et Siddique, K.H.M.** 2020. Impact of climate change on biology and management of wheat pests. *Crop Protection*, 137: 105304 [en ligne]. [Consulté le 31 mars 2021]. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105304>

- Bale, J.S. et Hayward, S.A.L.** 2010. Insect overwintering in a changing climate. *The Journal of Experimental Biology*, 213: 980-994.
- Battilani, P., Toscano, P., van der Fels-Klerx, H.J., Moretti, A., Camardo Leggieri, M., Brera, C., Rortais, A. et al.** 2016. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 6: 24328 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
- Battisti, A.** 2008. Forests and climate change; lessons from insects. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 1: 1-5 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3832/ifor0210-0010001>
- Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E. et Larsson, S.** 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12: 662-667.
- Bebber, D.P., Ramotowski, M.A.T. et Gurr, S.J.** 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change*, 3: 985-988.
- Bentz, B.J. et Jönsson, A.M.** 2015. Modeling bark beetle responses to climate change. Dans F.E. Vega et R.W. Hofstetter (dir. pub.). *Bark beetles – biology and ecology of native and invasive species*, p. 533-553. Cambridge, État du Massachusetts (États-Unis d'Amérique), Academic Press, Elsevier.
- Bergsma-Viami, M., van de Bilt, J.L.J., Tjou-Tam-Sin, N.N.A., van de Vossenberg, B.T.L.H. et Westenberg, M.** 2015. *Xylella fastidiosa* in *Coffea arabica* ornamental plants imported from Costa Rica and Honduras in The Netherlands. *Journal of Plant Pathology*, 97: 395.
- Betz, O., Srisuka, W. et Puthz, V.** 2020. Elevational gradients of species richness, community structure, and niche occupation of tropical roove beetles (Coleoptera: Staphylinidae: Steninae) across mountain slopes in Northern Thailand. *Evolutionary Ecology*, 34: 193-216.
- Biber-Freudenberger, L., Ziemacki, J., Tonnang, H.E.Z. et Borgemeister, C.** 2016. Future risks of pest species under changing climatic conditions. *PLoS ONE*, 11: e0153237 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153237>
- Billore, S.D.** 2019. Weeds in soybean vis-à-vis other crops – a review. *Soybean Research*, 17: 1-21.
- Bingna, H., Feifei, C., Yue, S., Kun, Q., Yan, W., Changjiao, S., Xiang, Z. et al.** 2018. Advances in targeted pesticides with environmentally responsive controlled release by nanotechnology. *Nanomaterials (Bâle, Suisse)*, 8(2): 102 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3390/nano8020102>
- Björkman, C. et Niemelä, P.** 2015. *Climate change and insect pests*. Wallingford (Royaume-Uni), CABI.
- Bonello, P., Campbell, F.T., Cipollini, D., Conrad, A.O., Farinas, C., Gandhi, K.J.K., Hain, F.P. et al.** 2020. Invasive tree pests devastate ecosystems – a proposed new response framework. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3: 2 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00002>
- Borkataki, S., Reddy, M.D., Nanda, S.P. et Taye, R.R.** 2020. Climate change and its possible impact on the existence of insect pests. *Ecology, Environment and Conservation*, 26: S271-S277.
- Bosso, L., Russo, D., Febbraro, M.D., Cristinzio, G. et Zoina, A.** 2016. Potential distribution of *Xylella fastidiosa* in Italy: A maximum entropy model. *Phytopathologia Mediterranea*, 55: 62-72.
- Bregaglio, S., Donatelli, M. et Confalonieri, R.** 2013. Fungal infections of rice, wheat, and grape in Europe in 2030–2050. *Agronomy for Sustainable Development*, 33: 767-776.
- Burne, A.R.** 2019. *Pest risk assessment: Halyomorpha halys (Brown marmorated stink bug)*. Version du 1^{er} juin 2019. Ministère des industries primaires, Nouvelle-Zélande.
- Butterworth, M.H., Semenov, M.A., Barnes, A., Moran, D., West, J.S. et Fitt, B.D.L.** 2010. North–south divide: Contrasting impacts of climate change on crop yields in Scotland and England. *Journal of the Royal Society Interface*, 7: 123-130.

- CABI.** 2021a. Fiche informative sur *Bursaphelenchus xylophilus* (nématode du pin). Dans *Invasive Species Compendium*. Wallingford (Royaume-Uni), CABI. [Consultée le 16 mars 2021]. www.cabi.org/isc/datasheet/10448#todistribution
- CABI.** 2021b. Fiche informative sur *Agrilus planipennis* (agrile du frêne). Dans *Invasive Species Compendium*. Wallingford (Royaume-Uni), CABI. [Consultée le 19 mars 2021]. www.cabi.org/isc/datasheet/3780#todistribution
- CABI.** 2021c. Fiche informative sur *Bactrocera oleae* (mouche de l'olive). Dans *Invasive Species Compendium*. Wallingford (Royaume-Uni), CABI. [Consultée le 19 mars 2021]. www.cabi.org/isc/datasheet/17689#todistribution
- Carvajal-Yepes, M., Cardwell, K., Nelson, A., Garrett, K.A., Giovani, B., Saunders, D., Kamoun, S. et al.** 2019. A global surveillance system for crop diseases. *Science*, 364: 1237-1239.
- Castellanos-Frías, D., de León, D.G., Bastida, F. et González-Andújar, J.L.** 2016. Predicting global geographical distribution of *Lolium rigidum* (rigid ryegrass) under climate change. *The Journal of Agricultural Science*, 154: 755-764.
- Castillo, N.E.T., Melchior-Martinez, E.M., Sierra, J.S.O., Ramirez-Mendoza, R.A., Parra-Saldivar, R. et Iqbal, H.M.N.** 2020. Impact of climate change and early development of coffee rust – an overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico. *Science of the Total Environment*, 738: 140225.
- Chakraborty, S. et Newton, A.C.** 2011. Climate change, plant diseases and food security: An overview. *Plant Pathology*, 60: 2-14.
- Chakraborty, S., Pangga, I.B. et Roper, M.M.** 2012. Climate change and multitrophic interactions in soil: The primacy of plants and functional domains. *Global Change Biology*, 18: 2111-2125.
- Chang, F.P., Kuang, L.Y., Huang, C.A., Jane, W.N., Hung, Y., Hsing, Y.I. et Mou, C.Y.** 2013. A simple plant gene delivery system using mesoporous silica nanoparticles as carriers. *Journal of Materials Chemistry B: Materials for Biology and Medicine*, 1(39): 5279-5287 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1039/c3tb20529k>
- Chen, J. et Henny, R.J.** 2006. Somaclonal variation: An important source for cultivar development of floriculture crops. Dans J.A. Teixeira da Silva (dir. pub.). *Floriculture, ornamental and plant biotechnology, Volume II*, p.244-253. Londres, Global Science Books.
- Choudhary, J.S., Kumari, M. et Fand, B.B.** 2019. Linking insect pest models with climate change scenarios to project against future risks of agricultural insect pests. *CAB Reviews*, 14: 055 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. www.cabi.org/cabreviews/review/20193460085
- Cilas, C. et Bastide, P.** 2020. Challenges to cocoa production in the face of climate change and spread of pests and diseases. *Agronomy*, 10: 1232 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091232>
- Clements, D.R. et DiTommaso, A.** 2011. Climate change and weed adaptation: Can evolution of invasive plants lead to greater range expansion than forecasted? *Weed Research*, 51: 227-240.
- Clements, D.R., DiTommaso, A. et Hyvönen, T.** 2014. Ecology and management of weeds in a changing climate. Dans B.S. Chauhan et G. Mahajan (dir. pub.). *Recent advances in weed management*, p. 13-37. New York (États-Unis d'Amérique), Springer Science + Business Media.
- Cooke, D.E.L., Cano, L.M., Raffaele, S., Bain, R.A., Cooke, L.R., Etherington, G.J., Deahl, K.L. et al.** 2012. Genome analyses of an aggressive and invasive lineage of the Irish potato famine pathogen. *PLoS Pathogens* 8(10): e1002940 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002940>
- Cornara, D., Morente, M., Markheiser, A., Bodino, N., Tsai, C.-W., Fereres, A., Redak, R.A., Perring, T.M. et Lopes, J.R.S.** 2019. An overview on the worldwide vectors of *Xylella fastidiosa*. *Entomologia Generalis*, 39(3-4): 157-181.
- Cunningham, F.J., Goh, N.S., Demirer, G.S., Matos, J.L. et Landry, M.P.** 2018. Nanoparticle-mediated delivery towards advancing plant genetic engineering. *Trends in Biotechnology*, 36(9): 882-897.
- Daughtrey, M. et Buitenhuis, R.** 2020. Integrated pest and disease management in greenhouse ornamentals. Dans M.L. Gullino, R. Albajes et P.C. Nicot (dir. pub.). *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*, p. 625-679. Dordrecht (Pays-Bas), Springer Nature.

- Day, R., Quinlan, M. et Ogutu, W.** 2006. *Analysis of the application of the phytosanitary capacity evaluation tool*. Rapport au Secrétariat de la Convention internationale pour la protection des végétaux.
- Debelo, D.G.** 2020. Predictions of climate change impacts on agricultural insect pests vis-à-vis food crop productivity: A critical review. *Ethiopian Journal of Science and Sustainable Development*, 7: 18-26.
- Delcour, I., Spanoghe, P. et Uyttendaele, M.** 2015. Literature review: Impact of climate change on pesticide use. *Food Research International*, 68: 7-15.
- Delucia, E.H., Nabity, P.D., Zavala, J.A. et Berenbaum, M.R.** 2012. Climate change: Resetting plant-insect interactions. *Plant Physiology*, 160: 1677-1685.
- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Huey, R.B., Shelton, K.S., Ghalambor, C.K., Haak, D.C. et Martin, P.R.** 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 105: 6668-6672.
- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Tigchelaar, M., Battisti, D.S., Merrill, S.C., Huey, R.B. et Naylor, R.L.** 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361: 915-919.
- Diamond, S.E.** 2018. Contemporary climate-driven range shifts: Putting evolution back on the table. *Functional Ecology*, 32: 1652-1665.
- Dilling, L., Daly, M.E., Travis, W.R., Wilhelmi, O.V. et Klein, R.A.** 2015. The dynamics of vulnerability: Why adapting to climate variability will not always prepare us for climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6: 413-425.
- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E.S.G. et Staver, C.P.** 2018. Fusarium wilt of banana: Current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1468 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
- Diyanat, M., Saeidian, H., Baziar, S. et Mirjafary, Z.** 2019. Preparation and characterization of polycaprolactone nanocapsules containing pretilachlor as a herbicide nanocarrier. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(21): 21579-21588 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05257-0>
- Donovan, G.H., Butry, D.T., Michael, Y.L., Prestemon, J.P., Liebhold, A.M., Demetrios Gatzliolis, D. et Mao, M.Y.** 2013. The relationship between trees and human health: Evidence from the spread of the emerald ash borer. *American Journal of Preventive Medicine*, 44(2): 139-145.
- Duan, J.J., Bauer, L.S., Van Driesche, R., Schmude, J.M., Petrice, T., Chandler, J.L. et Elkinton, J.** 2020. Effects of extreme low winter temperatures on the overwintering survival of the introduced larval parasitoids *Spathius galinae* and *Tetrastichus planipennisi*: Implications for biological control of emerald ash borer in North America. *Journal of Economic Entomology*, 113: 1145-1151.
- Duncan, L.W.** 2009. Managing nematodes in citrus orchards. Dans A. Ciancio et K.G. Mukerji (dir. pub.). *Integrated management of fruit crops and forest nematodes*, p. 135-173. Dordrecht (Pays-Bas), Springer Science+Business Media B.V.
- Duran, A., Gryzenhout, M., Slippers, B., Ahumada, R., Rotella, A., Flores, F., Wingfield, B.D. et Wingfield, M.J.** 2008. *Phytophthora pinifolia* sp. nov. associated with a serious needle disease of *Pinus radiata* in Chile. *Plant Pathology*, 57: 715-727.
- Eastburn, D.M., McElrone, A.J. et Bilgin, D.D.** 2011. Influence of atmospheric and climate change on plant-pathogen interactions. *Plant Pathology*, 60: 54-69.
- Edmonds, R.L.** 2013. General strategies of forest disease management. Dans P. Gonthier et G. Nicolotti (dir. pub.). *Infectious Forest Diseases*, p. 29-49. Wallingford (Royaume-Uni) et Boston, Massachusetts (États-Unis d'Amérique), CABI.

- Eigenbrode, S.D., Davis, T.S. et Crowder, D.W.** 2015. Climate change and biological control in agricultural systems: Principles and examples from North America. Dans C. Björkman et P. Niemelä (dir. pub.). *Climate change and insect pests*, p. 119-135. Wallingford (Royaume-Uni), CABI.
- El-Mergawy, R.A.A.M. et Al-Ajlan, A.M.** 2011. Red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier): Economic importance, biology, biogeography and integrated pest management. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 1: 1-23.
- El-Sabea, A.M. El-, Faleiro, J. et Abo-El-Saad, M.M.** 2009. The threat of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* to date plantations of the Gulf region in the Middle-East: An economic perspective. *Outlooks on Pest Management*, 20(3): 131-134.
- Erikson, L. et Griffin, R.** 2014. The international regulatory framework. Dans G. Gordh, S. McKirdy (dir. pub.). *The Handbook of Plant Biosecurity*, p. 27-44. Dordrecht (Pays-Bas), Springer Science+Business Media.
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M.A., Gladders, P. et Fitt, B.D.L.** 2008. Range and increase of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society Interface*, 5: 625-631.
- Fahim, M.A., Hassanein, M.K., Abou Hadid, A.F. et Kadah, M.S.** 2011. Impacts of climate change on the widespread and epidemics of some tomato diseases during the last decade in Egypt. *Acta Horticulturae*, 914: 317-320.
- Fahim, M.A., Hassanein, M.K. et Mostafa, M.H.** 2003. Relationships between climatic conditions and potato late blight epidemic in Egypt during winter seasons 1999–2001. *Applied Ecology and Environmental Research*, 1(1-2): 159-172.
- Falco, S.D., Adinolfi, F., Bozzola, M. et Capitanio, F.** 2014. Crop insurance as a strategy for adapting to climate change. *Journal of Agricultural Economics*, 65: 485-504.
- FAO.** 2008. *Maladies et organismes nuisibles transfrontières liés au climat. Document d'information technique de la consultation d'experts qui s'est tenue du 25 au 27 février 2008*. Rome. 59 pages (consultable à l'adresse www.fao.org/3/a-ai785e.pdf).
- FAO.** 2020. *Red palm weevil: Guidelines on management practices*. Rome, ix + 86 pages (consultable à l'adresse <https://doi.org/10.4060/ca7703en>).
- FAO.** 2021a. *Desert locust upsurge – progress report on the response in Southwest Asia (May–December 2020)*. Rome. 18 pages (consultable à l'adresse www.fao.org/3/cb2358en/cb2358en.pdf).
- FAO.** 2021b. *Cadre stratégique de la Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV) pour 2020-2030*. Rome, pour le compte du Secrétariat de la CIPV. 40 pages.
- Fedchock, C., Gould, W.P, Hennessey, M.K., Mennig, X. et Sosa, E.** 2006. *Trip report – Spanish lemon site visit: 23-30 septembre 2006*. Riverdale (États-Unis d'Amérique), Département de l'agriculture des États-Unis, Service de l'inspection de la santé des plantes et des animaux.
- Fiaboe, K.K.M., Peterson, A.T., Kairo M.T.K. et Roda, A.L.** 2012. Predicting the potential worldwide distribution of the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Curculionidae) using ecological niche modeling. *Florida Entomologist*, 95: 559-673.
- Flitters, N.E.** 1963. Observations on the effect of hurricane “Carla” on insect activity. *International Journal of Biometeorology*, 6: 85-92.
- Frank, S.D.** 2020. Review of the direct and indirect effects of warming and drought on scale insect pests of forest systems. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, cpaa033 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa033>
- Frem, M., Chapman, D., Fucilli, V., Choueiri, E., Moujabber, M.E., Notte, P.L. Altermatt, F.** 2020. *Xylella fastidiosa* invasion of new countries in Europe, the Middle East and North Africa: Ranking the potential exposure scenarios. *NeoBiota*, 59: 77-97 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3897/neobiota.59.53208>
- Fussmann, K.E., Schwarzmüller, F., Brose, U., Jousset, A. et Rall, B.C.** 2014. Ecological stability in response to warming. *Nature Climate Change*, 4: 206-210.

- García-Bastidas, F.A., Quintero-Vargas, Ayala-Vasquez, M., Schermer, T, Seidl, M.F., Santos-Paiva, M., Noguera A.M. et al.** 2019. First report of *Fusarium* wilt tropical race 4 in Cavendish bananas caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *Plant Disease* [en ligne]. [Consulté le 31 mars 2021]. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-1922-PDN>
- Garibaldi, A. et Gullino, M.L.** 1995. Focus on critical issues in soil and substrate disinfection towards the year 2000. *Acta Horticulturae*, 382: 21-36.
- Garibaldi, L., Kitzberger, T. et Chaneton, E.J.** 2011. Environmental and genetic control of insect abundance and herbivory along a forest elevational gradient. *Oecologia*, 167: 117-129.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R., Andersen, K.F., Brawner, J., Choudhury, R., Delaquis, E., Fayette, J., Poudel, R., Purves, D. et Rothschild, J.** 2020b. Effective altruism as an ethical lens on research priorities. *Phytopathology*, 110: 708-722.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R.I., Andersen, K.F., Buddenhagen, C.E., Choudhury, R.A., Fulton, J.C., Hernandez Nopsa, J.F., Poudel, R. et Xing, Y.** 2018. Network analysis: A systems framework to address grand challenges in plant pathology. *Annual Review of Phytopathology*, 56: 559-580.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R.I., Andersen, K.F., Choudhury, R.A., Dantes, W., Fayette, J., Fulton, J.C., Poudel, R. et Staub, C.G.** 2020a. Adapting disease management systems under global change. Dans J.B. Ristaino et A. Records (dir. pub.). *Emerging plant diseases and global food security*, p.1-13. St. Paul (États-Unis d'Amérique), APS Press.
- Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N. et Travers, S.E.** 2006. Climate change effects on plant disease: Genomes to ecosystems. *Annual Review of Phytopathology*, 44: 489-509.
- Garrett, K.A., Nita, M., De Wolf, E.D., Esker, P.D., Gomez-Montano, L. et Sparks, A.H.** 2016. Plant pathogens as indicators of climate change. Dans T.M. Letcher (dir. pub.). *Climate change: Observed impacts on planet Earth*, 2^e édition, p. 325-338. Amsterdam, Elsevier.
- Garrett, K.A., Nita, M., De Wolf, E.D., Esker, P.D., Gomez-Montano, L. et Sparks, A.H.** 2021. Plant pathogens as indicators of climate change. Dans T.M. Letcher (dir. pub.). *Climate change: Observed impacts on planet Earth*, 3^e édition, p. 499-513. Amsterdam, Elsevier.
- Ge X., He, S., Wang, T., Yan, W. et Zong, S.** 2015. Potential distribution predicted for *Rhynchophorus ferrugineus* in China under different climate warming scenarios. *PLoS ONE* 10(10): e0141111 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141111>
- Ghini, R., Bettiol, W. et Hamada, E.** 2011. Diseases in tropical plantation crops as affected by climate changes: Current knowledge and perspectives. *Plant Pathology*, 60: 122-132.
- Ghini, R., Hamada, E. et Bettiol, W.** 2008. Climate change and plant diseases. *Scientia Agrícola*, 65: 98-107.
- Ghini, R., Hamada, E. et Bettiol, W.** 2011. *Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil*. Brasília, Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente.
- Ghini, R., Hamada, E., Pedro Júnior, M.J. et Gonçalves, R.R.V.** 2011. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. *Summa Phytopathologica*, 37: 85-93.
- GIEC** (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2013. *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley [dir. pub.]). Cambridge (Royaume-Uni) et New York (États-Unis d'Amérique), Presses universitaires de Cambridge. 1535 pages.
- GIEC** (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2014a. *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (R.K. Pachauri et L.A. Meyer [dir. pub.]). Genève (Suisse). 161 pages (consultable à l'adresse https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf).

- GIEC** (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2014b. Résumé à l'intention des décideurs. Dans *Changements climatiques 2014: Incidences, adaptation et vulnérabilité. Partie A: Aspects mondiaux et sectoriels. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee *et al.* [dir. pub.]]. Cambridge (Royaume-Uni) et New York (États-Unis d'Amérique), Presses universitaires de Cambridge. 1-32. (consultable à l'adresse www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar5_wgII_spm_fr.pdf).
- GIEC** (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2018. *Réchauffement planétaire de 1,5 °C: Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani *et al.* [dir. pub.]). Genève (Suisse). 630 pages.
- GIEC** (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2019a. *Rapport spécial sur le changement climatique et les terres émergées* [en ligne]. [Consulté le 19 mars 2021]. www.ipcc.ch/srccl/
- GIEC** (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2019b. *Rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique* [en ligne]. [Consulté le 19 mars 2021]. www.ipcc.ch/srocc/
- Gilardi, G., Garibaldi, A. et Gullino, M.L.** 2018. Emerging pathogens as a consequence of globalization and climate change: Leafy vegetables as a case study. *Phytopathologia Mediterranea*, 57: 146-152.
- Gilardi, G., Gisi, U., Garibaldi, A. et Gullino, M.L.** 2017. Effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on the chemical and biological control of powdery mildew of zucchini and the Phoma leaf spot of leaf beet. *European Journal Plant Pathology*, 148: 229-236.
- Giovani, B., Blümel, S., Lopian, R., Teulon, D., Bloem, S., Galeano Mart nez, C., Beltrán Montoya, C. et al.** 2020. Science diplomacy for plant health. *Nature Plants*, 6: 902-905.
- Gitaitis, R. et Walcott, R.** 2007. The epidemiology and management of seedborne bacterial diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 45: 371-397.
- Godefroid, M., Cruaud, A., Rossi, J.P. et Rasplus, J.Y.** 2015. Assessing the risk of invasion by tephritid fruit flies: Intraspecific divergence matters. *PLoS ONE*, 10: e0135209 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135209>
- Godefroid, M., Cruaud, A., Streito, J.C., Rasplus, J.Y. et Rossi, J. P.** 2018. Climate change and the potential distribution of *Xylella fastidiosa* in Europe. *bioRxiv*, hal-02791548f [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://hal.inrae.fr/hal-02791548/document>
- Godefroid, M., Cruaud, A., Streito, J.-C., Rasplus, J.-Y. et Rossi, J.-P.** 2019. *Xylella fastidiosa*: Climate suitability of European continent. *Scientific Reports*, 9: 8844 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45365-y>
- Godefroid, M., Morente, M., Schartel, T., Cornara, D., Purcell, A., Gallego, D., Moreno, A., Pereira, J.A. et Fereres, A.** 2020. The risk of *Xylella fastidiosa* outbreaks will decrease in the Mediterranean olive-producing regions. *bioRxiv* [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1101/2020.07.16.206474>
- Goergen, G., Kumar, P.L., Sankung, S.B., Togola, A. et Tamò, M.** 2016. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa. *PLoS ONE* 11(10): e0165632. [en ligne]. [Consulté le 15 mars 2021]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165632>
- Goswami, A., Roy, I., Sengupta, S. et Debnath, N.** 2010. Novel applications of solid and liquid formulations of nanoparticles against insect pests and pathogens. *Thin Solid Films*, 519(3): 1252-1257.

- Gouache, D., Bensadoun, A., Brun, F., Page, C., Makowski, D. et Wallach, D.** 2013. Modelling climate change impact on *Septoria tritici* blotch (STB) in France: Accounting for climate model and disease uncertainty. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170: 242-252.
- Gouache, D., Roche, R., Pieri, P. et Bancal, M.O.** 2011. Évolution de quelques pathosystèmes sur le blé et la vigne. Dans N. Brisson et F. Levrault (dir. pub.). *Le Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010) - Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces*, section B5 Santé, Les thèmes, p. 113-126. France, Agence de la transition écologique (ADEME).
- Gregory, P.J., Johnson, S.N., Newton, A.C. et Ingram, J.S.I.** 2009. Integrating pests and pathogens into the climate change/food security debate. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2827-2838.
- Grillo, R., Dos Santos, N.Z.P., Maruyama, C.R., Rosa, A.H., de Lima, R. et Fraceto, L.F.** 2012. Poly(ϵ -caprolactone) nanocapsules as carrier systems for herbicides: Physico-chemical characterization and genotoxicity evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 231-232: 1-9.
- Grünig, M., Mazzi, D., Calanca, P., Karger, D.N. et Pellissier, L.** 2020. Crop and forest pest metawebs shift towards increased linkage and suitability overlap under climate change. *Communications Biology*, 3: 233 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0962-9>
- Gullino, M.L., Gilardi, G. et Garibaldi, A.** 2014a. Seed-borne pathogens of leafy vegetable crops. Dans M.L. Gullino et G. Munkvold (dir. pub.). *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*, p. 47-53. Dordrecht (Pays-Bas), Springer.
- Gullino, M.L., Gilardi, G. et Garibaldi, A.** 2014b. Chemical and non-chemical seed dressing for leafy vegetable crops. Dans M.L. Gullino et G. Munkvold (dir. pub.). *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*, p. 125-136. Dordrecht (Pays-Bas), Springer.
- Gullino, M.L., Gilardi, G. et Garibaldi, A.** 2019. Ready-to-eat salad crops: A plant pathogen's heaven. *Plant Disease*, 103: 2153-2170.
- Gullino, M.L. et Munkvold, G. (dir. pub.).** 2014. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*. Dordrecht (Pays-Bas), Springer. 136 pages.
- Gullino, M.L., Pugliese, M., Gilardi, G. et Garibaldi, A.** 2018. Effect of increased CO₂ and temperature on plant diseases: A critical appraisal of results obtained in studies carried out under controlled environment facilities. *Journal of Plant Pathology*, 100: 371-389.
- Gullino, M.L., Pugliese, M., Paravicini, A., Casulli, E., Rettori, A., Sanna, M. et Garibaldi, A.** 2011. New phytotron for studying the effect of climate change on plant pathogens. *Journal of Agricultural Engineering*, 1: 1-11.
- Gullino, M.L., Tabone, G., Gilardi, G. et Garibaldi, A.** 2020. Effects of elevated atmospheric CO₂ and temperature on the management of powdery mildew of zucchini. *Journal of Phytopathology*, 168: 405-415.
- Gutierrez, A.P., Ponti, L. et Cossu, Q.A.** 2009. Effects of climate warming on Olive and olive fly (*Bactrocera oleae* [Gmelin]) in California and Italy. *Climatic Change*, 95: 195-217.
- Haack, R.A., Jendek, E., Liu, H.P., Marchant, K.R., Petrice, T.R., Poland, T.M. et Ye, H.** 2002. The emerald ash borer: A new exotic pest in North America. *Newsletter of the Michigan Entomological Society*, 47: 1-5.
- Hakata, M., Wada, H., Masumoto-Kubo, C., Tanaka, R., Sato, H. et Morita, S.** 2017. Development of a new heat tolerance assay system for rice spikelet sterility. *Plant Methods*, 13(1): 34 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0185-3>
- Hannukkala, A.O., Kaukoranta, T., Lehtinen, A. et Rahkonen, A.** 2007. Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933-2002: Increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. *Plant Pathology*, 56: 167-176.

- Harvell, C.D., Mitchell, C.E., Ward, J.R., Altizer, S., Dobson, A.P., Ostfeld, R.S. et Samuel, M.D.** 2002. Climate warming and disease risk for terrestrial and marine biota. *Science*, 296: 2158-2162.
- Harvey, J.A., Heinen, R., Gols, R. et Thakur, M.P.** 2020. Climate change-mediated temperature extremes and insects: From outbreaks to breakdowns. *Global Change Biology*, 26: 6685-6701.
- Heeb, L., Jenner, E. et Cock, M.J.W.** 2019. Climate-smart pest management: Building resilience of farms and landscapes to changing pest threats. *Journal of Pest Science*, 92: 951-969.
- Heltberg, R., Siegel, P.B. et Jorgensen, S.L.** 2009. Addressing human vulnerability to climate change: Toward a 'no-regrets' approach. *Global Environmental Change*, 19: 89-99.
- Heraud, J.** 2018. Blue River Technology. *Resource*, 25(6): 12-12.
- Herms, D.A. et McCullough, D.G.** 2014. Emerald ash borer invasion of North America: History, biology, ecology, impacts, and management. *Annual Review of Entomology*, 59: 13-30.
- Hill, M.P. et Thomson, L.J.** 2015. Species distribution modelling in predicting response to climate change. Dans C. Björkman et P. Niemelä (dir. pub.). *Climate change and insect pests*, p. 16-37. Wallingford (Royaume-Uni), CABI.
- Hoffmann, A.A., Rymer, P.D., Byrne, M., Ruthrof, K.X., Whinam, J., McGeoch, M., Bergstrom, D.M. et al.** 2019. Impacts of recent climate change on terrestrial flora and fauna: Some emerging Australian examples. *Austral Ecology*, 44: 3-27.
- Howden, S.M., Gifford, R.G. et Meinke, H.** 2010. Grains. Dans C. Stokes et M. Howden (dir. pub.). *Adapting agriculture to climate change: Preparing Australian agriculture for the future*, p. 21-40. Melbourne (Australie), CSIRO.
- Hu, J., Angeli, S., Schuetz, S., Luo, Y. et Hajek, A.E.** 2009. Ecology and management of exotic and endemic Asian longhorned beetle *Anoplophora glabripennis*. *Agricultural and Forest Entomology*, 11: 359-375.
- Huang, J. et Hao, H.** 2020. Effects of climate change and crop planting on the abundance of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Ecology and Evolution*, 10: 1324-1338.
- Hunjan, M.S. et Lore, J.S.** 2020. Climate change: Impact on plant pathogens, diseases, and their management. Dans K. Jabran, S. Florentine et B.S. Chauhan (dir. pub.). *Crop protection under changing climate*, p. 85-100. Springer International Publishing.
- Ikegami, M. et Jenkins, T.A.R.** 2018. Estimate global risks of a forest disease under current and future climates using distribution model and simple thermal model – pine wilt disease as a model case. *Forest Ecology and Management*, 409: 343-352.
- Ingram, J.S.I., Gregory, P.J. et Izac, A.-M.** 2008. The role of agronomic research in climate change and food security policy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126(1-2): 4-12.
- Iscaro, J.** 2014. The impact of climate change on coffee production in Colombia and Ethiopia. *Global Majority E-Journal*, 5: 33-43.
- Jabran, K., Florentine, S. et Chauhan, B.S.** 2020. Impacts of climate change on weeds, insect pests, plant diseases and crop yields: Synthesis. Dans K. Jabran, S. Florentine et B.S. Chauhan (dir. pub.). *Crop protection under changing climate*, p. 189-196. Springer International Publishing.
- Jactel, H., Desprez-Loustau, M.L., Battisti, A., Brockerhoff, E., Santini, A., Stenlid, A., Björkman, C. et al.** 2020. Pathologists and entomologists must join forces against forest pest and pathogen invasions. *NeoBiota*, 58: 107-127.
- Jactel, H., Koricheva, J. et Castagneyrol, B.** 2019. Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35: 103-108.
- Janse, J.D. et Obradovic, A.** 2010. *Xylella fastidiosa*: Its biology, diagnosis, control and risks. *Journal of Plant Pathology*, 92: 35-48.

- Jeger, M., Bragard, C., Caffier, D., Candresse, T., Chatzivassiliou, E., Dehnen-Schmutz, K., Gilioli, G. *et al.* 2018. Pest risk assessment of *Spodoptera frugiperda* for the European Union. *EFSA Journal*, 16(8): 5351 [en ligne]. [Consulté le 6 avril 2021]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5351>
- Jeger, M.J. et Pautasso, M. 2008. Plant disease and global change – the importance of long-term data sets. *New Phytologist*, 177: 8-11.
- Jones, J.T., Haegeman, A., Danchin, E.G.J., Gaur, H.S., Helder, J., Jones, M.G.K., Kikuchi, T. *et al.* 2013. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 14: 946-961.
- Jones, R.A.C. 2016. Future scenarios for plant virus pathogens as climate change progresses. *Advances in Virus Research*, 95: 87-147.
- Jönsson A.M., Harding S., Krokene P., Lange H., Lindelow Å., Okland B., Ravn H.P y Schroeder, M. 2011. Modelling the potential impact of global warming on *Ips typographus* voltinism and reproductive diapause. *Climatic Change*, 109: 606-718.
- Junk, J., Jonas, M. et Eickermann, M. 2016. Assessing meteorological key factors influencing crop invasion by pollen beetle (*Meligethes aeneus* F.) – past observations and future perspectives. *Meteorologische Zeitschrift*, 25: 357-364.
- Juroszek, P., Racca, P., Link, S., Farhumand, J. et Kleinhenz, B. 2020. Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology*, 69: 179-193.
- Juroszek, P. et von Tiedemann, A. 2011. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. *Plant Pathology*, 60: 100-112.
- Juroszek, P. et von Tiedemann, A. 2013a. Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: A review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. *The Journal of Agricultural Science*, 151: 163-188.
- Juroszek, P. et von Tiedemann, A. 2013b. Climate change and potential future risks through wheat diseases. *European Journal of Plant Pathology*, 136: 21-33.
- Juroszek, P. et von Tiedemann, A. 2013c. Climatic changes and the potential future importance of maize diseases: A short review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 120: 49-56.
- Juroszek, P. et von Tiedemann, A. 2015. Linking plant disease models to climate change scenarios to project future risks of crop diseases: A review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122: 3-15.
- Karaca, M. et Dursun, S.S. 2020. Possible effects of climate change on weeds in agriculture. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 34: 111-117.
- Karkanis, A., Ntatsi, G., Alemardan, A., Petropoulos, S. et Bilalis, D. 2018. Interference of weeds in vegetable crop cultivation, in the changing climate of Southern Europe with emphasis on drought and elevated temperatures: A review. *The Journal of Agricultural Science*, 156: 1175-1185.
- Kellermann, V. et van Heerwaarden, B. 2019. Terrestrial insects and climate change: Adaptive responses in key traits. *Physiological Entomology*, 44: 99-115.
- Kimathi, E., Tonnang, H.E.Z., Subramanian, S., Cressman, K., Abdel-Rahman, E.M., Tesfayohannes, M., Niassy, S., Torto, B. *et al.* 2020. Prediction of breeding regions for the desert locust *Schistocerca gregaria* in East Africa. *Scientific Reports* 10: 11937 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68895-2>
- King, M., Altdorff, D., Li, P. Galagedara L., Holden, J. et Unc, A. 2018. Northward shift of the agricultural climate zone under 21st-century global climate change. *Scientific Reports*, 8: 7904 [en ligne]. [Consulté le 31 mars 2021]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26321-8>

- Kocmánková, E., Trnka, M., Eitzinger, J., Dubrovský, M., Štěpánek, P., Semerádová, D., Balek, J. *et al.* 2011. Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests at high spatial resolution: A novel approach. *The Journal of Agricultural Science*, 149: 185-195.
- Koo, T.H., Hong, S.J. *et al.* Yun, S.C. 2016. Changes in the aggressiveness and fecundity of hot pepper anthracnose pathogen (*Colletotrichum acutatum*) under elevated CO₂ and temperature over 100 infection cycles. *The Plant Pathology Journal*, 32: 260-265.
- Koricheva, J. *et al.* Larsson, S. 1998. Insect performance on experimentally stressed woody plants: A meta-analysis. *Annual Review Entomology*, 43: 195-216.
- Korres, N.E., Norsworthy, J.K., Tehranchian, P., Gitsopoulos, T.K., Loka, D.A., Oosterhuis, D.M., Gealy, D.R. *et al.* 2016. Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36: 12 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0350-5>
- Kremer, P., Schlüter, J., Racca, P., Fuchs, H.J. *et al.* Lang, C. 2016. Possible impact of climate change on the occurrence and the epidemic development of cercospora leaf spot disease (*Cercospora beticola* sacc.) in sugar beets for Rhineland-Palatinate and the southern part of Hesse. *Climatic Change*, 137: 481-494.
- Kriticos, D.J., Watt, M.S., Potter, K.J.B., Mannig, L.K., Alexander, N.S. *et al.* Tallent-Halsell, N. 2011. Managing invasive weeds under climate change: Considering the current and potential future distribution of *Buddleja davidii*. *Weed Research*, 51: 85-96.
- Kumar, N. *et al.* Khurana, S.M.P. 2020. Invasion of major fungal diseases in crop plants and forest trees due to recent climate fluctuations. Dans A. Raj, M.K. Jhariya, D.K. Yadav, *et al.* Banerjee (dir. pub.). *Climate Change and Agroforestry Systems: Adaptation and Mitigation Strategies*, Chapter 8, p. 209-236. Burlington (Canada), Apple Academic Press.
- Launay, M., Caubel, J., Bourgeois, G., Huard, F., de Cortazar-Atauri, I.G., Bancal, M.O. *et al.* Brisson, N. 2014. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 197: 147-158.
- Launay, M., Zurfluh, O., Huard, F., Buis, F., Bourgeois, G., Caubel, J., Huber, L. *et al.* Bancal, M.O. 2020. Robustness of crop disease response to climate change signal under modelling uncertainties. *Agricultural Systems*, 178: 102733.
- Leguizamón, E.S. *et al.* Acciaresi, H.A. 2014. Climate change and the potential spread of *Sorghum halepense* in the central area of Argentina based on growth, biomass allocation and eco-physiological traits. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 26: 101-113.
- Lehmann, P., Ammunet, T., Barton, M., Battisti, A., Eigenbrode, S.D., Jepsen, J.U., Kalinkat, G. *et al.* 2020. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18: 141-150.
- Liang, L. *et al.* Fei, S. 2014. Divergence of the potential invasion range of emerald ash borer and its host distribution in North America under climate change. *Climatic Change*, 122: 735-746.
- Liebhold, A.M. *et al.* Kean, J.M. 2019. Eradication and containment of non-native forest insects: Successes and failures. *Journal of Pest Science*, 92: 83-91.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B.M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D. *et al.* Henry, K. 2014. Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4: 1068-1072.
- Litkas, V.D., Migeon, A., Navajas, M., Tixier, M.S. *et al.* Stavrinides, M.C. 2019. Impacts of climate change on tomato, a notorious pest and its natural enemy: Small scale agriculture at higher risk. *Environmental Research Letters*, 14: 084041 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3313>
- Liu, T., Wan, A., Liu, D. *et al.* Chen, X. 2017. Changes of races and virulence genes in *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the wheat stripe rust pathogen, in the United States from 1968 to 2009. *Plant Disease*, 101: 1522-1532.

- Lopian, R.** 2018. *Climate change, sanitary and phytosanitary measures and agricultural trade. The state of agricultural commodity markets (SOCO) 2018: Background paper*. Rome, FAO. 48 pages (consultable à l'adresse www.fao.org/3/CA2351EN/ca2351en.pdf).
- Loustau, D., Ogee J., Dufrene, E., Deque, M., Duponey, J.I., Badeau, V., Viovy, N. et al.** 2007. Impacts of climate change on temperate forests and interaction with management. Dans P.H. Freer-Smith, M.S.J. Broadmeadow et J.M. Lynch (dir. pub.). *Forestry and climate change*, p. 243-250. Wallingford (Royaume-Uni), CABI.
- Luck, I., Spackman, M., Freeman, A., Trebicki, P., Griffiths, W., Finlay, K. et Chakraborty S.** 2011. Climate change and diseases of food crops. *Plant Pathology*, 60: 113-121.
- Luo, Y., TeBeest, D.O., Teng, P.S. et Fabellar, N.G.** 1995. Simulation studies on risk analysis of rice blast epidemics associated with global climate change in several Asian countries. *Journal of Biogeography*, 22: 673-678.
- Luo, Y., Teng, P.S., Fabellar, N.G. et TeBeest, D.O.** 1998. The effects of global temperature change on rice leaf blast epidemics: a simulation study in three agroecological zones. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 68: 187-196.
- Macfayden, S., McDonald, G. et Hill, M.P.** 2018. From species distributions to climate change adaptation: Knowledge gaps in managing invertebrate pests in broad-acre grain crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 253: 208-219.
- Maclean, I.M.D.** 2020. Predicting future climate at high spatial and temporal resolution. *Global Change Biology*, 26(2): 1003-1011.
- Madgwick, J.W., West, J.S., White, R.P., Semenov, M.A., Townsend, J.A., Turner, J.A. et Fitt, B.D.L.** 2011. Impacts of climate change on wheat anthesis and fusarium ear blight in the UK. *European Journal of Plant Pathology*, 130: 117-131.
- Magan, N., Medina, A. et Aldred, D.** 2011. Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre-and postharvest. *Plant Pathology*, 60: 150-163.
- McConnachie, A.J., Strathie, L.W., Mersie, W., Gebrehiwot, L., Zewdie, K., Abdurehim, A., Abrha, B., Araya, T., Asaregew, F., Assefa, F., Gebre-Tsadik, R., Nigatu, L., Tadesse, B. et Tana, T.** 2011. Current and potential geographical distribution of the invasive plant *Parthenium hysterophorus* (Asteraceae) in eastern and southern Africa. *Weed Research*, 51: 71-84.
- Manisankar, G. et Ramesh, T.** 2019. Response of weeds under elevated CO₂ and temperature: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, SP2: 427-431.
- Marshall, K.E., Gotthard, K. et Williams, C.M.** 2020. Evolutionary impacts of winter climate change on insects. *Current Opinion in Insect Science*, 41: 54-62.
- Massad, T.J. et Dyer, L.A.** 2010. A meta-analysis of the effects of global environmental change on plant-herbivore interactions. *Arthropod-Plant Interactions*, 4: 181-188.
- Matzrafi, M., Seiwert, B., Reemtsma, T., Rubin, B. et Peleg, Z.** 2016. Climate change increases the risk of herbicide-resistant weeds due to enhanced detoxification. *Planta*, 244: 1217-1227.
- McCullough, D.G., Work, T.T., Cavey, J.F., Liebhold, A.M. et Marshall, D.** 2006. Interceptions of nonindigenous plant pests at US ports of entry and border crossings over a 17-year period. *Biological Invasions*, 8: 611-630.
- Medina, A., Akbar, A., Baazeem, A., Rodriguez, A. et Managan, N.** 2017. Climate change, food security and mycotoxins. Do we know enough? *Fungal Biology Reviews*, 31(3): 143-154.
- Mehmood, M.Z., Afzal, O., Aslam, M.A., Riaz, H., Raza, M.A., Ahmed, S., Qadir, G. et al.** 2020. Disease modeling as a tool to assess the impacts of climate variability on plant diseases and health. Dans M. Ahmed (dir. pub.). *Systems modeling*, p. 327-351. Singapour, Springer Nature Singapore.
- Melloy, P., Hollaway, G., Luck, J., Norton, R., Aitken, E. et Chakraborty, S.** 2010. Production and fitness of *Fusarium pseudograminearum* inoculum at elevated carbon dioxide in FACE. *Global Change Biology*, 16: 3363-3373.

- Meurisse, N., Rassati, D., Hurley, B.P., Brockerhoff, E.G. et Haack, R.A.** 2019. Common pathways by which non-native forest insects move internationally and domestically. *Journal of Pest Science*, 92: 13-27.
- Meynard, C.N., Gay, P.E., Lecoq, M., Foucart, A., Piou, C. et Chapuis, M.P.** 2017. Climate-driven geographic distribution of the desert locust during recession periods: Subspecies' niche differentiation and relative risks under scenarios of climate change. *Global Change Biology*, 23: 4739-4749.
- Miedaner, T. et Juroszek, P.** 2021a. Climate change will influence disease resistance breeding in wheat in Northwestern Europe. *Theoretical and Applied Genetics* [en ligne]. [Consulté le 13 mars 2021]. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03807-0>
- Miedaner, T. et Juroszek, P.** 2021b. Global warming and increasing maize cultivation demand comprehensive efforts in disease and insect resistance breeding in north-western Europe. *Plant Pathology* [en ligne]. [Consulté le 26 février 2021]. <https://doi.org/10.1111/ppa.13365>
- Mikkelsen, B.L., Jørgensen, R.B. et Lyngkjær, M.F.** 2014. Complex interplay of future climate levels of CO₂, ozone and temperature on susceptibility to fungal diseases in barley. *Plant Pathology*, 64: 319-327.
- Misra, A.K., Yadav, S.B., Mishra, S.K. et Tripathi, M.K.** 2020. Impact of meteorological variables and climate change on plant diseases. Dans P. Kumar, A.K. Tiwari, M. Kamle, Z. Abbas et P. Singh (dir. pub.). *Plant pathogens – detection and management for sustainable agriculture*, p. 313-327. Oakville, Ontario Canada), Apple Academic Press.
- Moriyama, M. et Numata, H.** 2019. Ecophysiological responses to climate change in cicadas. *Physiological Entomology*, 44: 65-76.
- Mostert, D., Molina, A.B., Daniells, J., Fourie, G., Hermanto, C., Chao, C.P., Fabregar, E. et al.** 2017. The distribution and host range of the banana Fusarium wilt fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, in Asia. *PLoS ONE*, 12: e0181630 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181630>
- Munkvold, G.P.** 2009. Seed pathology progress in the academia and industry. *Annual Review of Phytopathology*, 47: 285-311.
- Munkvold, G.P. et Gullino, M.L.** 2020. Seed and propagative material. Dans M.L. Gullino, R. Albajes et P.C. Nicot (dir. pub.). *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*, p.331-679. Dordrecht (Pays-Bas), Springer Nature.
- Naidu, V.S.G.R.** 2015. Climate change, crop-weed balance and the future of weed management. *Indian Journal of Weed Science*, 47: 288-295.
- Niblack, T.L.** 2005 Soybean cyst nematode management reconsidered. *Plant Disease*, 89: 1020-1026.
- NIMP n° 2.** 2019. *Cadre de l'analyse du risque phytosanitaire*. Rome, Secrétariat de la CIPV, FAO.
- NIMP n° 5.** *Glossaire des termes phytosanitaires*. Rome, Secrétariat de la CIPV, FAO.
- NIMP n° 6.** 2018. *Surveillance*. Rome, Secrétariat de la CIPV, FAO.
- NIMP n° 11.** 2019. *Analyse du risque phytosanitaire pour les organismes de quarantaine*. Rome, Secrétariat de la CIPV, FAO.
- NIMP n° 20.** 2019. *Directives pour un système phytosanitaire de réglementation des importations*. Rome, Secrétariat de la CIPV, FAO.
- NIMP n° 21.** 2019. *Analyse du risque phytosanitaire pour les organismes réglementés non de quarantaine*. Rome, Secrétariat de la CIPV, FAO.
- O'Bannon, J.H. et Tomerlin, A.T.** 1973. Citrus tree decline caused by *Pratylenchus coffeae*. *Journal of Nematology*, 5: 311-316.
- OEPP** (Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes). 2020a. Liste A1 des organismes nuisibles recommandés pour réglementation en tant qu'organismes de quarantaine 2020-09. Dans *Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes* [en ligne]. [Consultée le 28 décembre 2020]. www.eppo.int/ACTIVITIES/plant_quarantine/A1_list

- OEPP** (Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes). 2020b. Premier signalement de *Spodoptera frugiperda* en Israël. Service d'information de l'OEPP, n° 08-2020: 2020/161. Dans *Base de données mondiale de l'OEPP* [en ligne]. Paris. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://gd.eppo.int/reporting/article-6839>
- OEPP** (Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes). 2021a. *Anoplophora glabripennis*. Fiches informatives de l'OEPP sur les organismes nuisibles recommandés pour la réglementation. Dans *Base de données mondiale de l'OEPP* [en ligne]. [Consulté le 20 février 2021]. <https://gd.eppo.int/taxon/ANOLGL/datasheet>
- OEPP** (Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes). 2021b. *Agrilus planipennis*. Fiche informative de l'OEPP mise à jour en janvier 2021. Dans *Base de données mondiale de l'OEPP* [en ligne]. [Consultée le 20 février 2021]. <https://gd.eppo.int/taxon/AGRLPL/datasheet>
- OEPP** (Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes). 2021c. Répartition mondiale actuelle de *Bactrocera dorsalis* (DACUDO) telle qu'enregistrée en janvier 2021 et articles du Service d'information. Dans *Base de données mondiale de l'OEPP* [en ligne]. [Consulté le 20 février 2021]. <https://gd.eppo.int/taxon/DACUDO/distribution> et <https://gd.eppo.int/taxon/DACUDO/reporting>
- Oliveira, H., Stolf-Moreira, R., Martinez, C., Grillo, R., Jesus, M. et Fraceto, L.** 2015. Nanoencapsulation enhances the post-emergence herbicidal activity of atrazine against mustard plants. *PLoS ONE*, 10(7): e0132971 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132971>
- Ormsby, M. et Brenton-Rule, E.** 2017. A review of global instruments to combat invasive alien species in forestry. *Biological Invasions*, 19: 3355-3364.
- Paini, D.R., Mwebaze, P., Kuhnert, P.M. et Kriticos, D.J.** 2018. Global establishment threat from a major forest pest via international shipping: *Lymantria dispar*. *Scientific Reports*, 8: 13723. [en ligne] [Consulté le 12 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31871-y>
- Palmer, G., Platts, P.J., Brereton, T., Chapman, J.W., Dytham, C., Fox, R., Pearce-Higgins, J.W., Roy, D.B., Hill, J.K. et Thomas, C.D.** 2017. Climate change, climatic variation and extreme biological responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 372: 20160144.
- Paraschivu, M., Cotuna, O., Paraschivu, M. et Olaru, L.** 2019. Effects of interaction between abiotic stress and pathogens in cereals in the context of climate change: An overview. *Annals of the University of Craiova*, XLIX: 413-424.
- Paterson, R.R.M. et Lima, N.** 2019. Ecology and biotechnology of thermophilic fungi on crops under global warming. Dans S.M. Tiquia-Arashiro et M. Grube (dir. pub.). *Fungi in extreme environments: Ecological role and biotechnological significance*, p. 81-96. Springer International Publishing.
- Pautasso, M.** 2013. Responding to diseases caused by exotic tree pathogens. Dans P. Gonthier et G. Nicolotti (dir. pub.). *Infectious Forest Diseases*, p. 29-49. Wallingford (Royaume-Uni) et Boston (États-Unis d'Amérique), CABI.
- Pautasso, M., Doring, T.F., Garbelotto, M., Pellis, L. et Jeger, M.J.** 2012. Impacts of climate change on plant diseases – opinions and trends. *European Journal of Plant Pathology*, 133: 295-313.
- Pegg, K.G., Coates, L.M., O'Neill, W.T. et Turner, D.W.** 2019. The epidemiology of Fusarium wilt of banana. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1395 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01395>
- Pegg, G., Taylor, T., Entwistle, P., Guymer, G., Giblin, F. et Carnegie, A.** 2017. Impact of *Austropuccinia psidii* (myrtle rust) on Myrtaceae-rich wet sclerophyll forests in south east Queensland. *PLoS ONE* 12(11): e0188058 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188058>
- Peng, H.X.X., Sivasithamparam, K. et Turner, D.W.W.** 1999. Chlamydospore germination and Fusarium wilt of banana plantlets in suppressive and conducive soils are affected by physical and chemical factors. *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 1363-1374.

- Perez, C., Nicklin, C., Dangles, O., Vanek, S., Sherwood, S., Halloy, S., Garrett, K.A. et Forbes, G. 2010. Climate change in the high Andes: Implications and adaptation strategies for small-scale farmers. *International Journal of Environmental, Cultural, Economic and Social Sustainability*, 6: 71-88.
- Perrone, G., Ferrara, M., Medina, A., Pascale, M. et Magan, N. 2020. Toxigenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: Ecology, genomics, distribution, prediction and prevention of the risk. *Microorganisms*, 8: 1496 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101496>
- Peters, K., Breitsameter, L. et Gerowitt, B. 2014. Impact of climate change on weeds in agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38: 707-721.
- Peterson, A.T, Menon, S. et Li, X. 2010. Recent advances in the climate change biology literature: Describing the whole elephant. *WIREs Climate Change*, 1: 548-555.
- Ploetz, R.C. 2005. Panama disease, an old nemesis rears its ugly head: Part 1 – The beginnings of the banana export trades. *Plant Health Progress*, 6(1) [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1094/PHP-2005-1221-01-RV>
- Ploetz, R.C. et Pegg, K.G. 2000. Fungal diseases of root, corm and pseudostem. Dans D.R. Jones (dir. pub.). *Diseases of banana abacá and enset*, p. 143-172. Wallingford (Royaume-Uni), CABI.
- Porter, J.R., Challinor, A.J., Henriksen, C.B., Howden, S.M., Martre, P. et Smith, P. 2019. IPCC, agriculture and food – a case of shifting cultivation and history. *Global Change Biology*, 25(8): 2518-2529.
- Prank, M., Kenaley, S.C., Bergstrom, G.C., Acevedo, M. et Mahowald, N.M. 2019. Climate change impacts the spread of wheat stem rust, a significant crop disease. *Environmental Research Letters*, 14: 124053 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab57de>
- Preisler, A.C., Pereira, A.E., Campos, E.V., Dalazen, G., Fraceto, L.F. et Oliveira, H.C. 2020. Atrazine nanoencapsulation improves pre-emergence herbicidal activity against *Bidens pilosa* without enhancing long-term residual effect on *Glycine max*. *Pest Management Science*, 76(1): 141-149.
- Pritchard, S.G. 2011. Soil organisms and global climate change. *Plant Pathology*, 60: 82-99.
- Priyanka, A.K.M., Varma, S., Kumar, V. et Sharma, R.S. 2020. Impact of climate change on plant diseases and management strategies: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8: 2968-2973.
- Pugliese, M., Gullino, M.L. et Garibaldi, A. 2010. Effects of elevated CO₂ and temperature on interactions of grapevine and powdery mildew: First results under phytotron conditions. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 117: 9-14.
- Qin, Z., Zhang, J.E., Di Tommaso, A., Wang, R.I. et Liang, K.M. 2016. Predicting the potential distribution of *Lantana camara* L. under RCP scenarios using ISI-MIP models. *Climatic Change*, 134: 193-208.
- Racca, P., Kakau, J., Kleinhenz, B. et Kuhn, C. 2015. Impact of climate change on the phenological development of winter wheat, sugar beet and winter oilseed rape in Lower Saxony, Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122: 16-27.
- Raderschall, C.A., Vico, G., Lundin, O., Taylor, A.R. et Bommarco, R. 2021. Water stress and insect herbivory interactively reduce crop yield while the insect pollination benefit is conserved. *Global Change Biology*, 27: 71-83.
- Rai, M. et Ingle, A. 2012. Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94 (2): 287-293 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3969-4>
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C. et Biswas, P. 2018. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: Current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6487-6503.
- Ramesh, K., Matloob, A., Aslam, F., Florentine, S.K. et Chauhan, B.S. 2017. Weeds in a changing climate: Vulnerabilities, consequences, and implications for future weed management. *Frontiers in Plant Science*, 8: 95 [en ligne]. [Consulté le 28 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00095>

- Ramirez-Cabral, N.Y.Z, Kumar, L. et Shabani, F.** 2017. Future climate scenarios project a decrease in the risk of fall armyworm outbreaks. *The Journal of Agricultural Science*, 155(8): 1219-1238.
- Ramirez-Cabral, N.Y.Z, Kumar, L. et Shabani, F.** 2019. Suitable areas of *Phakopsora pachyrhizi*, *Spodoptera exigua*, and their host plant *Phaseolus vulgaris* are projected to reduce and shift due to climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 135: 409-424.
- Ramsfield, T.D., Bentz, B.J., Faccoli, M., Jactel, H. et Brockerhoff, E.G.** 2016. Forest health in a changing world: Effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts. *Forestry*, 89: 245-252.
- Rathee, M. et Dalal, P.** 2018. Emerging insect pests in Indian agriculture. *Indian Journal of Entomology*, 80: 267-281.
- Reineke, A. et Thiéry, D.** 2016. Grapevine insect pests and their natural enemies in the age of global warming. *Journal of Pest Science*, 89: 313-328.
- Revich, B., Tokarevich, N. et Parkinson, A.J.** 2012. Climate change and zoonotic infections in the Russian Arctic. *International Journal of Circumpolar Health*, 71: 18792 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3402/ijch.v71i0.18792>
- Reynaud, B., Delatte, H., Peterschmitt, M. et Fargette, D.** 2009. Effects of temperature increase on the epidemiology of three major vector-borne viruses. *European Journal of Plant Pathology*, 123: 269-280.
- Richerzhagen, D., Racca, P., Zeuner, T., Kuhn, C., Falke, K., Kleinhenz, B. et Hau, B.** 2011. Impact of climate change on the temporal and regional occurrence of *Cercospora* leaf spot in Lower Saxony. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 118: 168-177.
- Rizzo, D., Garbelotto, M. et Hansen, E. M.** 2005. *Phytophthora ramorum*: Integrative research and management of an emerging pathogen in California and Oregon forests. *Annual Review of Phytopathology*, 43: 309-335.
- Robinet, C. et Roques, A.** 2010. Direct impacts of recent climate warming on insect populations. *Integrative Zoology*, 5: 132-142.
- Roth, M.G., Webster, R.W., Mueller, D.S., Chilvers, M.I., Faske, T.R., Mathew, F.M., Bradley, C.A., Damicone, J.P., Kabbage, M. et Smith, D.L.** 2020. Integrated management of important soybean pathogens of the United States in changing climate. *Journal of Integrated Pest Management*, 11: 17 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa013>
- Ruttledge, A. et Chauhan, B.S.** 2020. Climate change and weeds of cropping systems. Dans K. Jabran, S. Florentine et B.S. Chauhan (dir. pub.). *Crop protection under changing climate*, p. 57-84. Springer International Publishing.
- Sabry, K. et Ragaei, M.** 2018. Nanotechnology and their applications in insect's pest control. Dans: K.A. Abd-Elsalam et R. Prasad (dir. pub.). *Nanobiotechnology applications in plant protection*, p. 1-28. Cham, Springer International Publishing AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91161-8>.
- Salinari, F., Giosuè, S., Rettori, A., Rossi, V., Tubiello, F.N., Spanna, F., Rosenzweig, C. et Gullino, M.L.** 2006. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology*, 12: 1299-1307.
- Salinari, F., Giosuè, S., Rossi, V., Tubiello, F.N., Rosenzweig, C. et Gullino, M.L.** 2007. Downy mildew outbreaks on grapevine under climate change: Elaboration and application of an empirical-statistical model. *Bulletin OEPP*, 37: 317-326.
- Salvacion, A.R., Cumagun, C.J.R., Pangga, I.B., Magcale-Macandog D.B., Cruz, P.C.S., Saludes, R.B., Solpot, T.C. et Aguilar, E.A.** 2019. Banana suitability and Fusarium wilt distribution in the Philippines under climate change. *Spatial Information Research*, 27: 339-349.
- Santini, A. et Battisti, A.** 2019. Complex insect-pathogen interactions in tree pandemics. *Frontiers in Physiology*, 10: 550 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00550>
- Saponari, M., Boscia, D., Nigro, F. et Martelli, G.P.** 2013. Identification of DNA sequences related to *Xylella fastidiosa* in oleander, almond and olive trees exhibiting leaf scorch symptoms in Apulia (Southern Italy). *Journal of Plant Pathology*, 95(3): 668.

- Saunders, D.G.O., Pretorius, Z.A. et Hovmøller, M.S.** 2019. Tackling the re-emergence of wheat stem rust in Western Europe. *Communications Biology*, 2: 51 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0294-9>
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J., Esker, P., McRoberts, N. et Nelson, A.** 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3: 430-439.
- Scalone, R., Lemke, A., Stefanic, E., Kolseth, A.K., Rasic, S. et Andersson, L.** 2016. Phenological variation in *Ambrosia artemisiifolia* L. facilitates near future establishment at northern latitudes. *PLoS ONE*, 11: e0166510 [en ligne]. [Consulté le 31 mars 2021]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166510>
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C.L., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., Butchart, S.H.M. et al.** 2016. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*, 354 (6313): aaf7671.
- Schneider, K., van der Werf, W., Cendoya, M., Mourits, M., Navas-Cortes J.A., Vicent, A. et Lansink, A.O.** 2020. Impact of *Xylella fastidiosa* subspecies *pauc* in European olives. *PNAS*, 117: 9250-9259.
- Schumann, G.L.** 1991. *Plant diseases: Their biology and social impact*. St Paul (États-Unis d'Amérique), APS Press.
- Scott, N.R., Chen, H. et Cui, H.** 2018. Nanotechnology applications and implications of agrochemicals toward sustainable agriculture and food systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6451-6456.
- Scott, P. et Williams, N.** 2014. Phytophthora diseases in New Zealand forests. *New Zealand Journal of Forestry*, 59: 14-21.
- Secrétariat de la CIPV.** 1997. *Convention internationale pour la protection des végétaux*. Rome, FAO (consultable à l'adresse https://assets.ippc.int/static/media/files/publications/fr/2013/06/03/1034340690890_frippc_201304232117fr.pdf).
- Secrétariat de la CIPV.** 2012. *Stratégie de renforcement des capacités phytosanitaires nationales de la CIPV* [en ligne]. Rome, FAO. 24 pages. [Consulté le 6 avril 2021]. www.ippc.int/static/media/files/mediakit/IPPCCapacityDevelopmentStrategy-fr.pdf
- Secrétariat de la CIPV.** 2016. *Surveillance des organismes nuisibles: Un guide pour comprendre les principales exigences des programmes de surveillance à l'intention des organisations nationales de protection des végétaux* [en ligne]. Rome, FAO. [Consulté le 6 avril 2021]. www.fao.org/3/ca3764fr/CA3764fr.pdf
- Secrétariat de la CIPV.** 2020a. Première détection de *Spodoptera frugiperda* (chenille légionnaire d'automne) aux Émirats arabes unis. Signalement d'organisme nuisible daté du 10 mai 2020. Dans *Convention internationale pour la protection des végétaux* [en ligne]. Rome, FAO. [Consulté le 28 décembre 2020]. www.ippc.int/fr/countries/united-arab-emirates/pestreports/2020/05/the-first-detection-of-fall-armywormfam-spodoptera-frugiperda-in-united-arab-emirates
- Secrétariat de la CIPV.** 2020b. Première détection de *Spodoptera frugiperda* (chenille légionnaire d'automne) en Jordanie. Signalement d'organisme nuisible daté du 27 septembre 2020. Dans *Convention internationale pour la protection des végétaux* [en ligne]. Rome, FAO. [Consulté le 28 décembre 2020]. www.ippc.int/fr/countries/jordan/pestreports/2020/09/report-of-first-detection-of-spodoptera-frugiperda-fall-armyworm-faw-in-jordan-1/
- Secrétariat de la CIPV.** 2021. Détection de *Spodoptera frugiperda* (chenille légionnaire d'automne) en Australie. Signalement d'organisme nuisible daté du 5 mai 2021. Dans *Convention internationale pour la protection des végétaux* [en ligne]. Rome, FAO. [Consulté le 20 mai 2021]. <https://www.ippc.int/en/countries/australia/pestreports/2021/05/spodoptera-frugiperda-fall-armyworm-detections-australia/>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano G., Wild, J. et al.** 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7: 395-402.
- Shabani, F., Ahmadi, M., Kumar, L., Soljouy-Fad, S., Tehrani, M.S., Shabani, F., Kalantar, B. et Esmaeili, A.** 2020. Invasive weed species' threats to global biodiversity: Future scenarios of changes in the number of invasive species in a changing climate. *Ecological Indicators*, 116: 106436 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106436>

- Shabani, F. et Kumar, L.** 2013. Risk levels of invasive *Fusarium oxysporum* f. sp. in areas suitable for date palm (*Phoenix dactylifera*) cultivation under various climate change projections. *PLoS ONE*, 8: e83404 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083404>
- Shaibu, A.S., Li, B., Zhang, S. et Sun, J.** 2020. Soybean cyst nematode-resistance: Gene identification and breeding strategies. *The Crop Journal*, 8(6): 892-904 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.03.001>
- Sharma, S., Hooda, K.S. et Goswami, P.** 2019. Scenario of plant diseases under changing climate. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8: 2490-2495.
- Shaw, M.W. et Osborne, T.M.** 2011. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change. *Plant Pathology*, 60: 31-43.
- Sicard, A., Zeilinger, A.R., Vanhove, M., Schartel, T.E., Beal, D.J., Daugherty, M.P. et Almeida, R.P.P.** 2018. *Xylella fastidiosa*: Insights into an emerging plant pathogen. *Annual Review of Phytopathology*, 56: 181-202.
- Siciliano, I., Berta, F., Bosio, P., Gullino, M.L. et Garibaldi, A.** 2017a. Effect of different temperatures and CO₂ levels on *Alternaria* toxins produced on cultivated rocket, cabbage and cauliflower. *World Mycotoxin Journal*, 10: 63-71.
- Siciliano, I., Bosio, P., Gilardi, G., Gullino, M.L. et Garibaldi, A.** 2017b. Verrucaric acid and roridin E produced on spinach by *Myrothecium verrucaria* under different temperatures and CO₂ levels. *Mycotoxin Research*, 33: 139-146.
- Sidorova, I. et Voronina, E.** 2020. Terrestrial fungi and global climate change. Dans J. Marxsen (dir. pub.). *Climate change and microbial ecology: Current research and future trends*, 2^e édition, Chapitre 5. Poole (Royaume-Uni), Caister Academic Press. (consultable à l'adresse <https://doi.org/10.21775/9781913652579.05>).
- Singh, V.K., Shukla, A.K. et Singh, A.K.** 2019. Impact of climate change on plant-microbe interactions under agroecosystems. Dans K.K. Choudhary, A. Kumar et A.K. Singh (dir. pub.). *Climate change and agricultural ecosystems*, p. 153-179. Cambridge (Royaume-Uni), Woodhead Publishing, Elsevier.
- Skelsey, P., Cooke, D.E.L., Lynott, J.S. et Lees, A.K.** 2016. Crop connectivity under climate change: Future environmental and geographic risks of potato late blight in Scotland. *Global Change Biology*, 22: 3724-3738.
- Sousa, E., Naves, P., Bonifácio, L., Henriques, J., Inácio, M.L. et Evans, H.** 2011. Survival of *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus galloprovincialis* in pine branches and wood packaging material. *Bulletin OEPP*, 41: 203-207.
- Sparks, A.H., Forbes, G.A., Hijmans, R.J. et Garrett, K.A.** 2014. Climate change may have limited effect on global risk of potato late blight. *Global Change Biology*, 20: 3621-3631.
- Srivastava, A., Kumar, S.N. et Aggarwal, P.K.** 2010. Assessment of vulnerability of sorghum to climate change in India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138: 160-169.
- Stack, J., Fletcher, J. et Gullino, M.L.** 2013. Climate change and plant biosecurity: A new world disorder? Dans: B. Bodo, C. Burnley, I. Comandicea, A. Maas et R. Roffey (dir. pub.). *Global environmental change: New drivers for resistance, crime and terrorism*, p. 161-181. Baden-Baden (Allemagne), Nomos.
- STDF/Banque mondiale.** 2011. *Changement climatique et commerce: Relation avec les normes sanitaires et phytosanitaires*. Document conjoint de la Banque mondiale, Groupe de recherches sur le développement, Commerce et intégration internationale (DECTI), et du Fonds pour l'application des normes et le développement du commerce (FANDC) Genève (Suisse), 26 pages (consultable à l'adresse www.standardsfacility.org/sites/default/files/STDF_Climate_Change_FR_0.pdf).
- St-Marseille, A.F.G., Bourgeois, G., Brodeur, J. et Mimee, B.** 2019. Simulating the impacts of climate change on soybean cyst nematode and the distribution of soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264: 178-187.
- Stoeckli, S., Felber, R. et Haye, T.** 2020. Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model. *International Journal of Biometeorology*, 64: 2019-2032 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01992-z>

- Storkey, J., Stratonovitch, P., Chapman, D. et Vidotto, F.** 2014. A process-based approach to predicting the effect of climate change on the distribution of an invasive allergenic plant in Europe. *PLoS ONE*, 9: e88156 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088156>
- Stover, R.H.** 1986. Disease management strategies and the survival of the banana industry. *Annual Review of Phytopathology*, 24: 83-91.
- Strand, J.F.** 2000. Some agrometeorological aspects of pest and disease management for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103: 73-82.
- Sturrock, R.N., Frankel, S.J., Brown, A.V., Hennon, P.E., Kliejunas, J.T. et Lewis, K.J.** 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60: 133-149.
- Su, C., Ji, Y., Gao, S., Cao, S., Xu, X., Zhou, C. et Liu, Y.** 2020. Fluorescence-labeled abamectin nanopesticide for comprehensive control of pinewood nematode and *Monochamus alternatus* hope. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(44): 16555-16564 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05771>
- Suggitt, A.J., Wilson, R.J., Isaac, N.J., Beale, C.M., Auffret, A.G., August, T., Maclean, I.M.D. et al.** 2018. Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering. *Nature Climate Change*, 8(8): 713-717.
- Sun, Y., Ding, J., Siemann, E. et Keller, S.R.** 2020. Biocontrol of invasive weeds under climate change: Progress, challenges and management implications. *Current Opinion in Insect Science*, 38: 72-78.
- Sutherst, R.W.** 1991. Pest risk analysis and the greenhouse effect. *Review of Agricultural Entomology*, 79: 1177-1187.
- Sutherst, R.W., Baker, R.H.A., Coakley, S.M., Harrington, R., Kriticos, D.J. et Scherm, H.** 2007. Pest under global change – meeting your future landlords? Dans J.G. Canadell, D.E. Pataki et L.F. Pitelka (dir. pub.). *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Berlin, Springer, p. 211-226.
- Sutherst, R.W., Constable, F., Finlay, K.J., Harrington, R., Luck, J. et Zalucki, M.P.** 2011. Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. *WIREs Climate Change*, 2: 220-237.
- Sutherst, R.W., Maywald, G.F. et Russell, B.L.** 2000. Estimating vulnerability under global change: Modular modelling of pests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1-3): 303-319.
- Taylor, R.A.J., Herms, D.A., Cardina, J. et Moore, R.H.** 2018. Climate change and pest management: Unanticipated consequences of trophic dislocation. *Agronomy*, 8(1): 7 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.3390/agronomy8010007>
- Tenllado, F. et Canto, T.** 2020. Effects of a changing environment on the defences of plants to viruses. *Current Opinion in Virology*, 42: 40-46.
- Thomas J.E., Wood, T.A., Gullino, M.L. et Ortu, G.** 2017. Diagnostic tools for plant biosecurity. Dans M.L. Gullino, J. Stack, J. Fletcher et J. Mumford (dir. pub.). *Practical tools for plant and food biosecurity*, p. 209-226. Dordrecht (Pays-Bas), Springer.
- Thomas-Sharma, S., Abdurahman, A., Ali, S., Andrade-Piedra, J., Bao, S., Charkowski, A., Crook, D. et al.** 2016. Seed degeneration in potato: The need for an integrated seed health strategy to mitigate the problem in developing countries. *Plant Pathology*, 65: 3-16.
- Thomson, L.J., MacFadyen, S. et Hoffmann, A.A.** 2010. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*, 52: 296-306.
- Torney, F., Trewyn, B.G., Lin, V.S.-Y. et Wang, K.** 2007. Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants. *Nature Nanotechnology*, 2(5): 295-300.
- Torresen, K.S., Fykse, H., Rafoss, T. et Gerowitt, B.** 2020. Autumn growth of three perennial weeds at high latitude benefits from climate change. *Global Change Biology*, 26: 2561-2572.

- Trebicki, P.** 2020. Climate change and plant virus epidemiology. *Virus Research*, 286: 198059. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198059>
- Trebicki, P. et Finlay, K.** 2019. Pests and diseases under climate change; its threat to food security. Dans S.S. Yadav, R.J. Redden, J.L. Hatfield, A.W. Ebert et D. Hunter (dir. pub.). *Food security and climate change*, p. 229-249. New York (États-Unis d'Amérique), John Wiley et Sons Inc.
- Tresson, P., Brun, L., de Cortazar-Atauri, I.G., Audergon, J.M., Buléon, S., Chenevotot, H., Combe, F. et al.** 2020. Future development of apricot blossom blight under climate change in Southern France. *European Journal of Agronomy*, 112: 125960.
- Tylka, G.L. et Marett, C.C.** 2014. Distribution of the soybean cyst nematode, *Heterodera glycines*, in the United States and Canada: 1954 to 2014. *Plant Health Progress*, 15: 85-87.
- Valerio, M., Tomecek, M.B., Lovelli, S. et Ziska, L.H.** 2011. Quantifying the effect of drought on carbon dioxide-induced changes in competition between a C₃ crop and a C₄ weed (*Amaranthus retroflexus*). *Weed Research*, 51: 591-600.
- Van der Fels-Klerx, H.J., Liu, C. et Battilani, P.** 2016. Modelling climate change impacts on mycotoxin contamination. *World Mycotoxin Journal*, 9: 717-726.
- Van der Putten, W.H., Macel, M. et Visser, M.E.** 2010. Predicting species distribution and abundance responses to climate change: Why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365: 2025-2034.
- Vilà, M., Beaury, E.M., Blumenthal, D.M., Bradley, B.A., Early, R., Laginhas, B.B., Trillo, A., Dukes, J.S., Sorte, C.J.B. & Ibáñez, I.** 2021. Understanding the combined impacts of weeds and climate change on crops. *Environmental Research Letters*, 16: 034043.
- Viswanath, K., Sinha, P., Kumar, S.N., Sharma, T., Saxena, S., Panjwani, S., Pathak, H. et Shukla, S.M.** 2017. Simulation of leaf blast infection in tropical rice agro-ecology under climate change scenario. *Climatic Change*, 142: 155-167.
- Wan, J.Z. et Wang, C.J.** 2019. Contribution of environmental factors toward distribution of ten most dangerous weed species globally. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17: 14835-14846.
- Wang, C., Hawthorne, D., Qin, Y., Pan, X., Li, Z. et Zhu, S.** 2017. Impact of climate and host availability on future distribution of Colorado potato beetle. *Scientific Reports*, 7: 4489 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04607-7>
- Wang, C., Zhang, X., Pan, X., Li, Z. et Zhu, S.** 2015. Greenhouses: Hotspots in the invasive network for alien species. *Biodiversity and Conservation*, 24: 1825-1829.
- Wang, R., Li, Q., He, S., Liu, Y., Wang, M. et Jiang, G.** 2018. Modeling and mapping the current and future distribution of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* under climate change in China. *PLoS ONE*, 13: e0192153 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192153>
- Watt, M.S., Kriticos, D.J., Lamoureaux, S.L. et Bourdot, G.W.** 2011. Climate change and the potential global distribution of serrated tussock (*Nassella trichotoma*). *Weed Science*, 59: 538-545.
- Wattanapongsiri, A.** 1966. A revision of the genera *Rhynchophorus* and *Dynamis* (Coleoptera: Curculionidae). *Bulletin du Département des sciences agronomiques*. Bangkok, Département des sciences agronomiques.
- Wells, J.M., Raju, B.C., Hung, H.Y., Weisburg, W.G., Mandelco-Paul, L. et Brenner, D.J.** 1987. *Xylella fastidiosa* gen. nov., sp. nov.: Gram-negative, xylem-limited, fastidious plant bacteria related to *Xanthomonas* spp. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 37(2): 136-143.
- West, A.M., Kumar, S., Wakie, T., Brown, C.S., Stohlgren, J., Laituri, M. et Bromberg, J.** 2015. Using high-resolution future climate scenarios to forecast *Bromus tectorum* invasion in Rocky Mountain National Park. *PLoS ONE*, 10: e0117893 [en ligne]. [Consulté le 29 décembre 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117893>

- Wilkinson, K., Grant, W.P., Green, L.E., Hunter, S., Jeger, M.J., Lowe, P., Medley, G.F. et al.** 2011. Infectious diseases of animals and plants: An interdisciplinary approach. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366: 1933-1942.
- Williams, A.L., Wills, K.E., Janes, J.K., Van der Schoor, J.K., Newton, P.C.D. et Hovenden, M.J.** 2007. Warming and free-air CO₂ enrichment alter demographics in four co-occurring grassland species. *New Phytologist*, 176: 365-374.
- Williamson, V.M. et Gleason, C.A.** 2003. Plant-nematode interactions. *Current Opinion in Plant Biology*, 6: 327-333.
- Wolfe, D.W., Ziska, L., Petzoldt, C., Seaman, A., Chase, L. et Hayhoe, K.** 2008. Projected change in climate thresholds in the Northeastern U.S.: Implications for crops, pests, livestock, and farmers. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13: 555-575.
- Woolhouse, M.E.J., Webster, J.P., Domingo, E., Charlesworth, B. et Levin, B.R.** 2002. Biological and biomedical implications of the co-evolution of pathogens and their hosts. *Nature Genetics*, 32 (4): 569-577.
- Wright, D., Hammond, N., Thomas, G., MacLeod, B. et Abbott, L.K.** 2018. The provision of pest and disease information using Information Communication Tools (ICT); an Australian example. *Crop Protection*, 103: 20-29.
- Wu, E., Wang, Y.-P., Yahuza, L., He, M.-H., Sun, D.-L., Huang, Y.-M., Liu, Y.-C., Yang, L.N., Zhu, W. et Zhan, J.** 2020. Rapid adaptation of the Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans* to changing temperature. *Evolutionary Applications*, 13(4): 768-780.
- Wuebbles, D.J. et Hayhoe, K.** 2002. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, 57: 177-210.
- Yadav, S., Stow, A.J. et Dudaniec, R.** 2019. Detection of environmental and morphological adaptation despite high landscape genetic connectivity in a pest grasshopper (*Phaulacridium vittatum*). *Molecular Ecology*, 28: 3395-3412.
- Zacarias, D.A.** 2020. Global bioclimatic suitability for the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), and potential co-occurrence with major host crops under climate change scenarios. *Climatic Change*, 161: 555-566.
- Zhao, X., Cui, H., Wang, Y., Sun, C., Cui, B. et Zeng, Z.** 2018. Development strategies and prospects of nano-based smart pesticide formulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6504-651.
- Ziska, L.H., Blumenthal, D.M. et Franks, S.J.** 2019. Understanding the nexus of rising CO₂, climate change, and evolution in weed biology. *Invasive Plant Science and Management*, 12: 79-88.
- Ziska, L.H., Epstein, P.R. et Schlesinger, W.H.** 2009. Rising CO₂, climate change, and public health: Exploring the links to plant biology. *Environmental Health Perspectives*, 117: 155-158.



CIPV

La Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV) est un accord international sur la santé des végétaux qui vise à protéger les ressources végétales et à favoriser l'innocuité du commerce. Le projet de la CIPV est de faire en sorte que tous les pays aient la capacité à mettre en œuvre des mesures harmonisées pour prévenir l'introduction et la dissémination d'organismes nuisibles dans de nouveaux territoires, et réduire au minimum l'impact de ces organismes sur la sécurité alimentaire, le commerce, la croissance économique et l'environnement.

Organisation

- ◆ La CIPV compte plus de 180 parties contractantes.
- ◆ Chaque partie contractante est rattachée à une organisation nationale de la protection des végétaux (ONPV) et dispose d'un point de contact officiel de la CIPV.
- ◆ Dix organisations régionales de la protection des végétaux (ORPV) ont été établies pour coordonner les ONPV au niveau régional.
- ◆ Le secrétariat de la CIPV assure la liaison avec les organisations internationales compétentes afin d'aider au renforcement des capacités régionales et nationales.
- ◆ Le secrétariat de la CIPV est assuré par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).



Secrétariat de la Convention internationale pour la protection des végétaux
ippc@fao.org | www.ippc.int

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
Rome, Italie



ISBN 978-92-5-134500-9



9 789251 345009

CB4769FR/1/06.21