HAL
open science

Evaluation multicritère de scénarios d'adaptation au changement climatique pour la filière tournesol

Abderrahim Bouhenache

To cite this version:

Abderrahim Bouhenache. Evaluation multicritère de scénarios d'adaptation au changement climatique pour la filière tournesol. Agronomie. 2020. hal-03229678

HAL Id: hal-03229678

https://hal.inrae.fr/hal-03229678

Submitted on 19 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

Université Paul Valéry de Montpellier III

MASTER 2

GESTION DES TERRITOIRES ET DEVELOPPEMENT LOCAL

PARCOURS « GESTION AGRICOLE ET TERRITOIRES »

Mémoire présenté par : **BOUHENACHE Abderrahim**

Evaluation multicritère de scénarios d'adaptation au changement climatique pour la filière tournesol

Sous la direction de : **Hatem BELHOUCHETTE**

Septembre 2020

Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

Université Paul Valéry de Montpellier III

MASTER 2

GESTION DES TERRITOIRES ET DEVELOPPEMENT LOCAL

PARCOURS « GESTION AGRICOLE ET TERRITOIRES »

Mémoire présenté par : **BOUHENACHE Abderrahim**

Evaluation multicritère de scénarios d'adaptation au changement climatique pour la filière tournesol

Sous la direction de : **Hatem BELHOUCHETTE**

Encadré par : **Philippe DEBAEKE et Violaine DEYTIEUX**

Septembre 2020

« L'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier n'entend donner
aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans ce mémoire.
Ces opinions n'engagent que leur auteur. »

Résumé

Le tournesol est une culture modèle pour adresser les questionnements de l'effet du changement climatique sur l'évolution des risques de maladies. Cette étude s'intéresse aux impacts de quelques stratégies d'adaptation du tournesol basée sur i) l'esquive, ii) l'irrigation et iii) la culture en dérobée conçues essentiellement pour faire face aux contraintes abiotiques du changement climatique sur les tendances futures de trois maladies fongiques majeures de culture : phomopsis, mildiou et sclérotinia du capitule. Des modèles de prédiction de risque ont été construits pour ce faire. Les stratégies d'adaptation ont été ensuite évaluées en multicritère en prenant en compte les risques de ces maladies avec la production et l'impact sur l'environnement à différents sites de nord et de sud de la France.

Les résultats obtenus ont montré que les tendances d'évolutions sont différentes entre les trois maladies et en fonction des périodes de temps. Les tendances entre les sites sont souvent similaires. Avec comme sans adaptation, les risques de phomopsis et du mildiou diminuent en futur alors que le risque de sclérotinia du capitule reste invariable. Les tendances des risques sont peu sensibles aux stratégies étudiées. Les stratégies adaptations telles que évaluées dans le présent travail ne sont pas plus performantes que la référence dans la quasi-majorité des situations. La stratégie d'esquive arrive à avoir des performances similaires à celles de la référence. La stratégie d'irrigation est défavorisée par son fort impact sur l'environnement et la culture dérobée montre son intérêt notamment sur les sols profonds.

Ces résultats restent originaux mais les modèles construits pour prédire les risques maladies ainsi que la méthode d'évaluation multicritère sont à améliorer.

Mots clés auteur

Changement climatique, adaptation, maladies fongiques, modélisation, évaluation multicritère, tournesol.

Title: multi-criteria assessment of climate change adaptation scenarios for the sunflower crop

Abstract

Sunflower is an ideal crop to address questions about the effect of climate change on the evolution of crop diseases risk. The current study is interested in understanding the impacts of some sunflower adaptation strategies based on i) avoidance, ii) irrigation and iii) catch crop designed to face the abiotic constraints of climate change, on future trends of three major fungal diseases of the crop: phomopsis, downy mildew and Sclerotinia Head Rot. To achieve this, risk prediction models have been developed. The adaptation strategies were then assessed by a multi-criteria analysis, taking into account the risks of these fungal diseases, production and the impact on the environment on various sites in the north and south of France.

The results obtained showed that the evolution trends are different between the three diseases depending on the period. Trends between sites are often similar. With or without adaptation, the risks of phomopsis and downy mildew decrease in the future, while the risk of sclerotinia capitulum remains unchanged. The risk trends are not very sensitive to the strategies studied. The adaptation strategies as evaluated in this work do not perform better than the reference in most of situations. The avoidance strategy manages to have similar levels of performance to the reference, the irrigation strategy is disadvantaged by its strong impact on the environment and the catch crops shows its interest especially on deep soils.

These results obtained remain original, but the models built to predict disease risks as well as the multi-criteria evaluation method need to be improved.

Author keywords

Climate change, adaptation, fungal diseases, modelling, multi-criteria assessment, sunflower.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements les plus sincères à mes maîtres de stage M. DEBAEKE Philippe et Mme. DEYTIEUX Violaine d'avoir maintenu et encadré ce stage malgré les difficultés qui se sont présentées. Je leur exprime mes profondes reconnaissances pour les efforts qu'ils ont investi dans ce travail, leur précieux conseils, orientations, et surtout leur disponibilité durant toute la période de ce stage. Je leur remercie pour leurs qualités professionnelles ainsi que humaines.

Je remercie mon tuteur à l'IAM, M. BELHOUCHETTE Hatem, pour son suivi, ses encouragements et ses conseils.

Mes sincères remerciements s'adressent également à M. AUBERTOT Jean-Noël qui a accompagné de très près les étapes de réalisation de ce travail. Je lui remercie notamment pour son temps, son appui à la partie modélisation et ses précieuses orientations.

De Terres Inovia, je remercie Emmanuelle MESTRIES pour ses contributions sur les maladies du tournesol, GARRIC Bernard pour ses réflexions et expériences du terrain partagées ainsi que pour la tournée du tournesol qu'il m'a offert, et LECOMTE Vincent pour les données technico-économiques qu'il m'a fourni.

Je tiens à remercier également toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Table des Tableaux 3
Table des Figures 4
Liste des Annexes 6
Sigles et abréviations 7
Introduction 8
Partie 1 10
Revue bibliographique 10
1. Le tournesol 11
A. Description de la culture 11
B. Exigences de la culture 12
C. Caractéristiques agronomiques 12
D. Importance de la culture 12
2. Les maladies du tournesol 14
A. Le phomopsis 15
B. Le mildiou 18
C. Le sclérotinia 20
3. Le changement climatique et la nécessité d'adaptation en agriculture 21
A. Le changement climatique et l'agriculture 21
B. Le tournesol et le changement climatique : vulnérabilité et adaptation 22
4. La modélisation des maladies des cultures dans un contexte de changement climatique : enjeux et défis 23
5. Evaluation de la durabilité des systèmes de culture 24
A. L'évaluation multicritère ex-ante 24
B. La méthodologie DEX et la modélisation multi-attributs qualitative 24
Partie 2 26
Contexte et problématique 26
1. Contexte 27
A. Contexte général et originalité du travail 27
B. Le projet OPERATE 27
C. Pourquoi le tournesol dans cette étude ? 28
2. Problématique, hypothèses et démarche 28
Partie 3 31
Matériels et méthodes 31
1. Conception de scénarios d'adaptation 32
A. Définition, échelles, et régionalisation 32
B. Les ITK construits 32
2. Les maladies prises en compte 34
A. Choix des maladies 34
B. Hypothèses et simplifications 34

3. Modélisation 35
A. SUNFLO : modèle de culture pour la production du tournesol : 35
B. Modélisation des risques de maladies sur la plateforme X_Pest (ModelBuilder) 36
4. Simulation 40
A. Simulation de la production du tournesol avec SUNFLO 40
B. Simulation du risque maladies avec la plateforme X_Pest : 41
5. L'évaluation multicritère : 42
Partie 4 Résultats 47
1. Aperçu sur le climat futur 48
A. La pluviométrie 48
B. La température 49
2. Simulations avec SUNFLO 50
3. Simulations des risques de maladies fongiques 55
A. Le phomopsis 55
B. Le mildiou 58
C. Le sclérotinia du capitule 59
4. L'évaluation multicritère 60
A. Sites du sud 60
B. Sites du nord 65
Partie 5 Discussion 70
1. Résultats 71
A. Climat et performances de production 71
B. Les risques de maladies fongiques 71
C. L'évaluation multicritère 72
2. Limites et simplifications du travail 72
A. Retour sur la méthodologie 72
B. Retour sur les résultats 74
3. Perspectives 75
Conclusion 76
Références bibliographiques 77
Annexes 83

Table des Tableaux

Tableau 1. Description des pratiques culturales pour les ITK de référence et d'adaptation par région. 33
Tableau 2. Paramètres du modèle SimMat Diaporthe 37
Tableau 3. Valeurs seuils retenus des indicateurs et méthode de détermination 45
Tableau 4. Variations des rendements pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les valeurs représentent les moyennes ± les ES. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0.05$) d'après le test de Tukey. Site d'Avignon. 54
Tableau 5. Variations des rendements pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les valeurs représentent les moyennes ± les ES. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0.05$) d'après le test de Tukey. Site de Dijon. 55
Tableau 6. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Toulouse sur un sol superficiel. 63
Tableau 7. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de la référence à Avignon sur un sol profond sur les 3 périodes temporelles. 64
Tableau 8. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Avignon sur un sol superficiel pour es 3 périodes temporelles. 65
Tableau 9. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Dijon sur un sol profond. 66
Tableau 10. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Dijon sur un sol superficiel. 66
Tableau 11. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Lusignan sur un sol profond sur les 3 périodes temporelles. 67
Tableau 12. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Lusignan sur un sol superficiel sur les 3 périodes temporelles. 67
Tableau 13. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Mons sur un sol profond sur les 3 périodes temporelles. 68
Tableau 14. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Mons sur un sol profond sur les 3 périodes temporelles. 68
Tableau 15. Synthèses des meilleures stratégies en termes de performance par situation d'après l'évaluation multicritère. Les couleurs du texte indiquent les niveaux de performance. 69

Table des Figures

Figure 1. Les stades repères de développement du tournesol....11
Figure 2. Principaux producteurs de tournesol dans le monde en 2019....13
Figure 3. Principales régions de production du tournesol en France 2019....14
Figure 4. Les principales maladies du tournesol par stade de développement....14
Figure 5. Répartition régionale du risque phomopsis....15
Figure 6. Cycle biologique de phomopsis....16
Figure 7. Symptôme typique de phomopsis sur feuille de tournesol....17
Figure 8. Tige cassée suite à une attaque de phomopsis....18
Figure 9. Symptômes du mildiou sur la plante et la feuille de tournesol....19
Figure 10. Répartition régionale du risque mildiou....20
Figure 11. Répartition régionale du risque sclérotinia capitule....21
Figure 12. Anomalie des moyennes annuelles de précipitations et de température : écart entre l'horizon lointain (2070-2100) et la période de référence (1976-2005). Scénario sans politique climatique (RCP 8.5)....22
Figure 13. Variation relative de rendement du tournesol dans des conditions non irriguées en 2030 en utilisant la réalisation «chaude» (a) et «froide» (b) du scénario A1B, sans stratégie d'adaptation envisagée....23
Figure 14. Schéma de la démarche générale....29
Figure 15. Schéma du modèle SUNFLO....36
Figure 16. Structure du modèle de prédiction de risque phomopsis sur la plateforme X_Pest....39
Figure 17. Localisation des sites retenus pour les simulations....41
Figure 18. Arborescence du modèle de l'évaluation multicritère avec les pondérations associées....43
Figure 19. Ecarts des cumuls moyens de précipitations pour les périodes Présent, F.P et F.L par rapport à la référence pendant le cycle du tournesol....48
Figure 20. Ecarts mensuels des cumuls moyens de précipitations pour les périodes Présent, F.P et F.L par rapport à la référence pendant le cycle du tournesol sur les sites du sud de la France....49
Figure 21. Ecarts mensuels des cumuls moyens de précipitations pour les périodes Présent, F.P et F.L par rapport à la référence pendant le cycle du tournesol sur les sites du Centre et du Nord de la France....49
Figure 22. Ecart de température moyenne pour les périodes Présent, F.P et F.L par rapport à la référence pendant le cycle de tournesol....50
Figure 23 Variations mensuelles de température moyenne par rapport à la référence pendant le cycle du tournesol pour les périodes Présent, F.P et F.L à Avignon et à Mons....50
Figure 24. Variations des rendements pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0.05$) d'après le test de Tukey. Site de Toulouse pour un sol profond....51
Figure 25. Variations de la teneur en huile pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0.05$) d'après le test de Tukey. Site de Toulouse pour un sol profond....52
Figure 26. Variations des rendements pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0.05$) d'après le test de Tukey. Site de Toulouse pour un sol superficiel....52
Figure 27. Variations de la teneur en huile au présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0.05$) d'après le test de Tukey. Site de Toulouse pour un sol superficiel....53
Figure 28. Evaluation de la qualité prédictive de modèle de nuisibilité de phomopsis avec une date de semis le 15 avril : matrice de confusion et paramètres statistiques de précision....56
Figure 29. Evaluation de la qualité prédictive de modèle de nuisibilité de phomopsis avec une date de semis le 10 avril : matrice de confusion et paramètres statistiques de précision....56
Figure 30. Evolution de risque de nuisibilité du phomopsis (infection combinée au passage sur tige) en fonction des périodes et des ITK....58
Figure 31. Evolution du risque d'infection des plantes par le mildiou en fonction des périodes et des ITK....59
Figure 32. Evolution du risque d'infection par le sclérotinia du capitule en fonction des périodes et des ITK....60
Figure 33. Evaluation de la performance des stratégies d'adaptation (Irrig : Irrigation ; Esq : Esquive ; Dérob : Dérobée) et de référence (Réf) pour les trois périodes de temps (P : Présent ; F.P : Futur Proche ; F.L : Futur Lointain), enun sol profond, site de Toulouse....61
Figure 34. Radar des stratégies à forte performance. Site de Toulouse pour un sol profond....61
Figure 35. Radar de performance de la stratégie d'irrigation sur les trois périodes. Site de Toulouse pour un sol profond....62

Figure 36. Radar de performance de la stratégie de dérobée sur les trois périodes. Site de Toulouse pour un sol profond. 62

Liste des Annexes

Annexe 1. Description du modèle de prédiction de risque de phomopsis construit sur la plateforme X_Pest

Annexe 2. Description du modèle de prédiction de risque d'infection par le mildiou construit sur la plateforme X_Pest

Annexe 3. Description du modèle de prédiction de risque d'infection par le sclérotinia du capitule construit sur la plateforme X_Pest

Annexe 4. Fonctions d'utilité et tables de règles de décision du modèle de l'évaluation multicritère

Annexe 5. Coûts unitaires des intrants et prix de vente utilisés pour les calculs économiques.

Sigles et abréviations

ACTA : Association de Coordination Technique Agricole

AVALIS : Institut du végétal

DJ : Degrés-Jours

DRIAS : Projet pour donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnements

GJ : Giga Joule

ha : hectare

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

MASC : Multi-Attribute assessment of the Sustainability of Cropping systems

OGM : Organisme Génétiquement Modifié (Genetically Modified Organism)

RCP : Representative Concentration Pathway

Introduction

L'agriculture est une activité économique qui dépend fortement du climat et des conditions météorologiques (Zayan, 2019). Les défis actuels de fournir des produits alimentaires en quantité et en qualité poussent la recherche à anticiper et proposer des solutions pour faire face aux conséquences des futures variations climatiques sur les agroécosystèmes (Launay *et al.,* 2020). Les impacts des augmentations de température et des pénuries d'eau dues au changement climatique sur les cultures ont été largement étudiés et de nombreux schémas d'adaptation pour limiter les stress abiotiques ont été conçus (Launay *et al.,* 2020 ; Pareek *et al.,* 2020). En comparaison, l'impact du changement climatique sur les facteurs biotiques reste mal compris, en particulier dans le cas des maladies fongiques et des risques sanitaires (Newbery *et al.,* 2016). La question sur l'impact de ces changements sur les risques sanitaires reçoit peu d'attention dans le débat scientifique actuel, malgré que le changement climatique affectera sans doute la distribution et la gravité des ravageurs et des maladies de cultures (Boonekamp, 2012 ; Juroszek et Von Tiedemann, 2015). D'après Oerke (2006) les ravageurs et les maladies sont et seront responsables des pertes de récoltes qui peuvent atteindre 40% dans le monde. La réduction de leur impact est plus nécessaire que jamais, comme les risques de baisse des rendements augmentent en raison du changement climatique (Newbery *et al.,* 2016). L'anticipation des impacts du changement climatique sur l'évolution des maladies des cultures est donc cruciale dans la réflexion sur les stratégies d'adaptation (Flood, 2010 ; Savary *et al.,* 2012).

Dans cette optique, la culture de tournesol est un modèle potentiel pour adresser ces questionnements. En raison de sa capacité de croissance dans différentes conditions agroécologiques et de sa tolérance modérée à la sécheresse, il pourrait devenir la culture oléagineuse de préférence en particulier à la lumière des changements environnementaux futurs (Miladinović *et al.,* 2019). Dans un contexte de plus en plus contraint, cette culture dispose de nombreux atouts agronomiques et écosystémiques à exploiter, notamment pour diversifier la rotation des cultures, assouplir les pressions sur les ressources en eau et faciliter la transition agroécologique (Debaeke *et al.,* 2017a ; Debaeke *et al.,* 2017b). Néanmoins, le principal problème de la production moderne du tournesol est l'existence d'un grand nombre de maladies dont la majorité est spécifique à la culture et qui provoquent une baisse significative du rendement (Miladinović *et al.,* 2019).

Afin d'explorer les risques futurs, les modèles représentent des outils très puissants pour la prévision des impacts sur la dynamique des maladies notamment fongiques (Orlandini *et al.,* 2017). D'autres part, les méthodes basées sur l'évaluation multicritère sont généralement utilisées comme outils d'aide à la décision pour évaluer les alternatives et les stratégies d'adaptation dans les systèmes agricoles, et incluent des critères multiples et éventuellement contradictoires (Bouyssou *et al.,* 2006). Sadok et al. (2008) l'ont suggéré comme particulièrement pertinentes pour gérer des problématiques multidimensionnelles. Elles permettent ainsi d'intégrer les risques sanitaires dans l'évaluation des stratégies d'adaptation et de trouver des compromis entre ces risques, la production et l'impact sur l'environnement.

Pour ce faire, des maladies de prédiction de risque vont permettre d'explorer les impacts des stratégies d'adaptation du tournesol conçues essentiellement pour faire face aux contraintes abiotiques du changement climatique sur les évolutions futures de maladies fongiques majeures de la culture. Un modèle d'évaluation multicritère va permettre d'intégrer les risques de ces maladies dans l'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre du projet OPERATE « crOP disEase Response to climATE change adaptation » qui vise à analyser et à évaluer les relations entre les stratégies d'adaptation au changement climatique (stress abiotiques) et le développement de maladies (stress biotiques) de trois grandes cultures en France : le blé tendre, le tournesol et la pomme de terre.

Dans ce document seront tout d'abord présentés des éléments bibliographiques pour comprendre les enjeux de la culture, les principales maladies et les concepts de base qui ont servi à mener notre étude. Puis, la démarche et les outils méthodologiques utilisés seront explicités. Enfin, les principaux résultats obtenus sur les tendances de maladies et l'évaluation multicritère seront présentés puis discutés.

Partie 1

Revue bibliographique

1. Le tournesol

A. *Description de la culture*

Le tournesol (*Helianthus annuus* L.) est une plante annuelle de la famille des composées (Astéracées). C'est une grande culture oléagineuse qui se cultive en été, à grand développement végétatif et aux larges feuilles. Sa hauteur varie de 2 à 4 mètres. Le système radiculaire est de type pivotant avec une racine principale et un fort réseau de racines secondaires. Avec des dates de semis qui se calent généralement entre le 20 avril et le 10 mai selon les régions françaises et les variétés, son cycle de 120 à 150 jours est en général plus court que celui des autres grandes cultures d'été (Lecomte et Nolot, 2011). Cinq périodes séparées par des stades repères peuvent être distinguées dans le cycle du tournesol (Fig. 1) : (a) Phase Semis-Levée (A0-A1) ; (b) Phase Levée - Stade cinq paires de feuilles (A1-B10) ; (c) Phase 5 paires de feuilles - Début floraison (B10-F1) ; (d) Période de floraison (F1-F4) ; (e) Période de remplissage des graines (F4-M3).

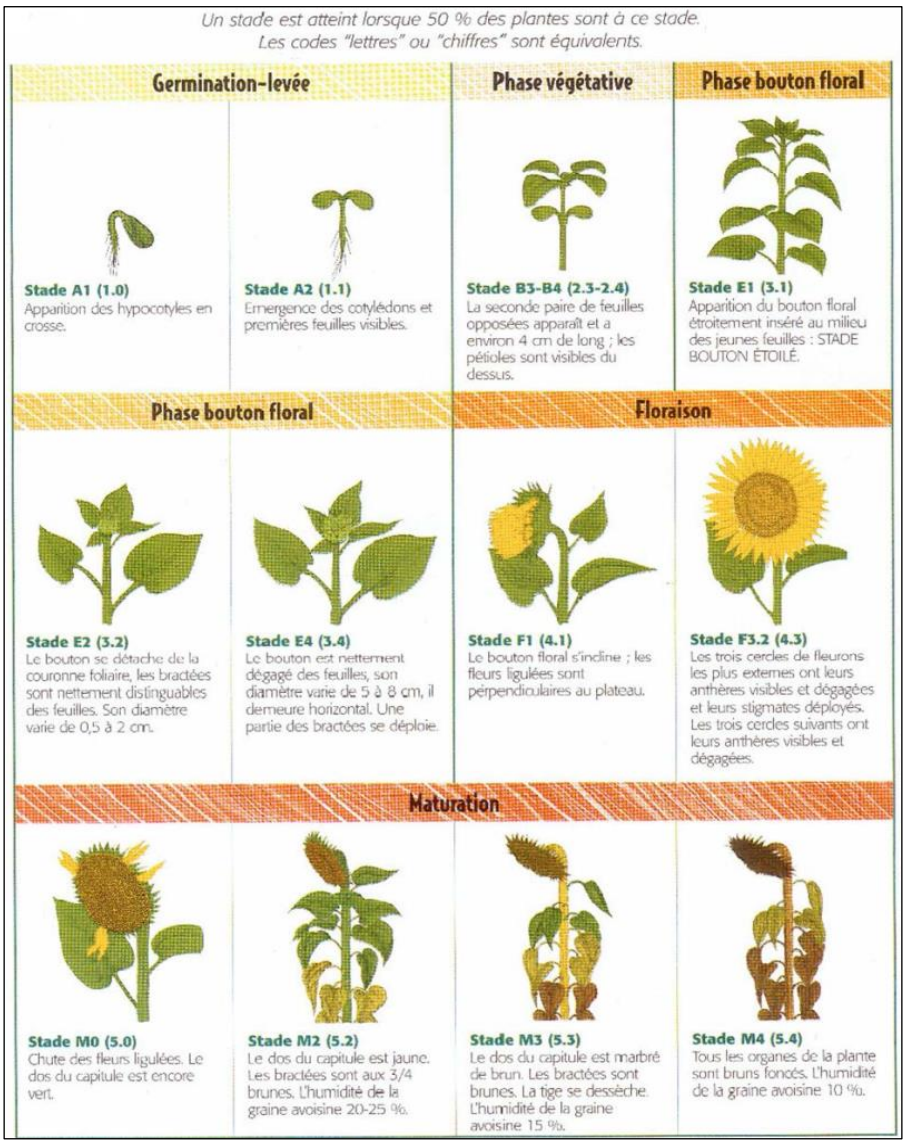

Figure 1. Les stades repères de développement du tournesol. Source : terresinovia.fr

Le tournesol est une espèce allogame avec une pollinisation entomophile, L'inflorescence est un capitule sommital de 10 à 30 cm de diamètre, composé d'un réceptacle charnu. Le fruit du tournesol est un akène, dormant à maturité. Il entoure une amande contenant de 55 à 70% d'huile. Le tournesol est cultivé principalement pour son huile, les co-produits (tourteaux protéiques déshuilés) étant valorisés en alimentation animale (INA P-G, 2003).

On distingue deux types de tournesol : le tournesol oléique qui contient en moyenne 84 % d'acide oléique dans sa fraction lipidique, faisant de cette huile la plus riche en cet acide gras, par comparaison au tournesol classique (dit linoléique) qui ne contient que 20 % d'acide oléique (Tonin, 2018).

B. *Exigences de la culture*

Le tournesol est l'une des rares cultures d'été qui soit modérément tolérante à la sécheresse. En conditions de culture optimales, la culture a besoin en moyenne d'une disponibilité hydrique de 390 mm à 420 mm. La seule période où le tournesol a impérativement besoin d'eau correspond aux 40 jours qui encadrent la floraison. En terme de température, le tournesol a un zéro de végétation théorique de 5 °C et les exigences en somme de température varient de 1600 à 1700 DJ pour les variétés les plus courantes soit précoces à demi-tardives (Lecomte et Nolot, 2011).

Pour l'implantation, la culture est tolérante à une large gamme de sols. Sa levée épigée est une phase de fragilité ce qui explique sa forte exigence en qualité de semis (structure et température du lit de semence, profondeur de semis, densité et écartement de semis). Son système radiculaire, pivotant, est très sensible aux accidents structuraux. Mais, s'il ne rencontre pas d'obstacle, il peut explorer le sol jusqu'à 2-3 mètres de profondeur (Ina P-G, 2003).

Le tournesol a des besoins modérés en fertilisation. Pour un objectif de rendement de 30 q/ha, une fumure azotée de 50 unités/ha lui suffit en général du fait de son besoin de rationnement et de son enracinement profond. La fertilisation phospho-potassique est de l'ordre de 40 à 50 unités de phosphore/ha et 50 à 60 unités de potasse/ha. Cependant, le tournesol est très exigeant en bore (oligo-élément). Une carence peut conduire à la chute du capitule par cisaillement de la tige, ou à des capitules mal garnis (INA P-G, 2003).

C. *Caractéristiques agronomiques*

Le tournesol est considéré comme une excellente tête d'assolement. Il est fréquemment cultivé avant une céréale à paille. La conservation dans le sol des organes de dissémination de certaines maladies du tournesol impose un délai de retour long sur une même parcelle (minimum 4 ans). L'idéal est de ne pas revenir sur la même parcelle avant 5 ans pour éviter toute pression biotique car il est sensible à une large gamme de ravageurs et de maladies (Ina P-G, 2003). De même, le tournesol est un précédent intéressant pour implanter une céréale d'hiver car il libère la parcelle suffisamment tôt. Il facilite le désherbage des graminées et apporte son aide en brisant le cycle de développement de certaines maladies spécifiques des céréales. À l'exception des herbicides, très peu d'autres pesticides (fongicides, insecticides) sont appliqués sur la culture du tournesol (Debaeke *et al.*, 2017a) ce qui se traduit par des IFT très faibles (e.g. de 1.5 à 2.2 en 2011) (Agreste, 2013).

Dans le monde, le tournesol est cultivé en tant que culture non OGM, avec un panel important de diversité génétique variétale (Debaeke *et al.*, 2017a). Il existe par contre des variétés résistantes à certains herbicides (Clearfield® ou Express Sun®) obtenues par mutagenèse. C'est une culture simple à conduire et économe en intrants (Lecomte et Nolot, 2011) labélisée « respectueuse de l'environnement » et qui offre une large gamme d'options d'adaptation dans le contexte actuel et futur grâce à ses possibilités d'insertion dans des systèmes agroécologiques (Debaeke *et al.*, 2017a; Debaeke *et al.*, 2017b).

D. *Importance de la culture*

a] Dans le monde

La production mondiale de graines de tournesol a fortement progressé depuis 30 ans, passant de 22 millions de tonnes (Mt) produites en 1990 sur 16.4 millions d'hectares (Mha) (Jouffret *et al.*, 2011) à 54.76 Mt produits en 2019 sur 26.39 Mha. Elle représente donc 9.4 % de la production mondiale de graines oléagineuses (580 Mt en 2019) (U.S.D.A, 2020). C'est la deuxième plus grande culture hybride après le maïs (Seiler *et al.*, 2017), et la troisième culture d'oléagineux, après le soja et le colza. Les deux tiers de la production mondiale sont situés entre l'Espagne et l'Oural. L'Ukraine et la Russie, qui ont

considérablement augmenté leurs surfaces, sont les deux premiers producteurs et représentent à eux deux le plus gros pôle de production mondiale du tournesol (Jouffret *et al.*, 2011) avec 16 Mt et 15.3 Mt respectivement en 2019 (U.S.D.A, 2020). L'Union Européenne, où l'espèce est cultivée principalement dans ses régions Sud et Est (Debaeke *et al.*, 2017b) vient en troisième position (Fig. 2) avec 9,7 Mt de graines produites (U.S.D.A, 2020). La valeur estimée de la production mondiale de tournesol est de 20 milliards de dollars américains en 2016 (Seiler *et al.*, 2017). La majorité de la production (90 %) est destinée à l'extraction d'huile et à la transformation en tourteaux (Jouffret *et al.*, 2011).

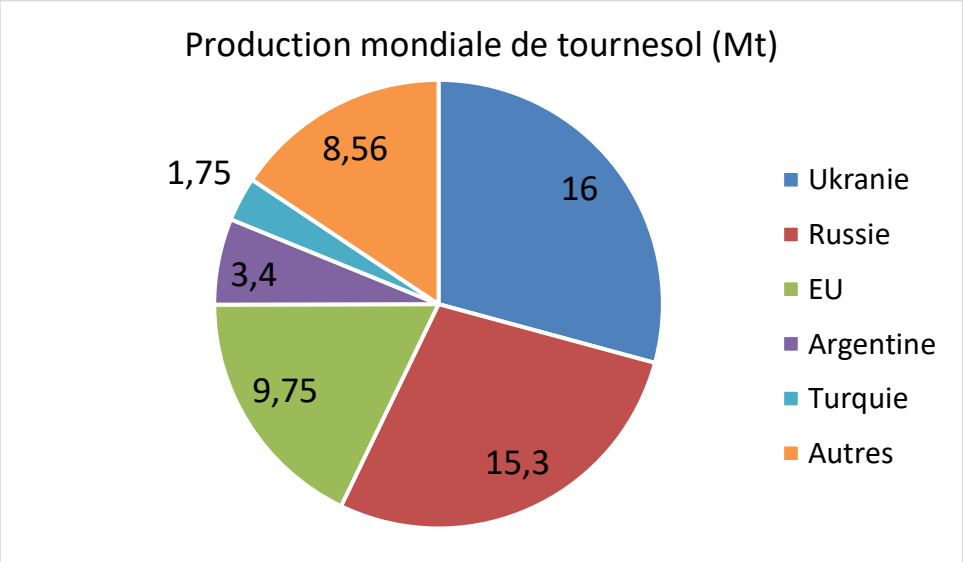

Figure 2. Principaux producteurs de tournesol dans le monde en 2019. Source : USDA (2020)

b] En France

Le tournesol est pour la France une culture relativement récente dont l'extension a véritablement démarré à la fin des années 70 avec le développement de la filière oléo-protéagineuse afin de réduire la dépendance aux protéines d'outre-Atlantique (Tonin, 2018). Le contexte agroéconomique lié aux mesures de la politique agricole commune plutôt défavorable était un frein pour le progrès de la culture. Mais, depuis 2007, des prix en moyenne plus élevés et un contexte réglementaire moins défavorable aux oléagineux ont contribué à une remontée des surfaces de tournesol (Jouffret *et al.*, 2011).

Bien que l'huile de tournesol classique représente 80 % de la consommation européenne d'huile de tournesol, la production de tournesol oléique a commencé au début des années 2000 en Europe de l'Ouest, et particulièrement en France où cette filière était une opportunité pour un marché vierge. Aujourd'hui, le tournesol oléique domine la production de variétés « classiques », avec une part dans l'assolement qui oscille entre 60 % et 70 % (Tonin, 2018). La culture du tournesol est surtout concentrée dans le Sud et l'Ouest de la France (Fig. 3). En terme de superficies et de production, elle vient en deuxième rang dans les cultures oléagineuses après le colza avec des rendements moyens relativement stables établis autour de 22 q/ha en 2019 (Agreste, 2020). La France dispose pour le tournesol du premier effort mondial en matière de sélection privée, basé sur le développement de semences hybrides. Les moyens déployés dans le Sud-ouest par les principales entreprises semencières mondiales ainsi que par les dispositifs de recherche sont très significatifs (Jouffret *et al.*, 2011).

Le tournesol a une place importante dans le système de culture et fournit plusieurs avantages et services écologiques (ex. pollinisateurs). Du point de vue économique, il redevient aussi compétitif avec un contexte favorable de prix. Cependant, il peut souffrir parfois de son image de "tolérant à tout" auprès de nombreux agriculteurs (Lecomte et Nolot, 2011).

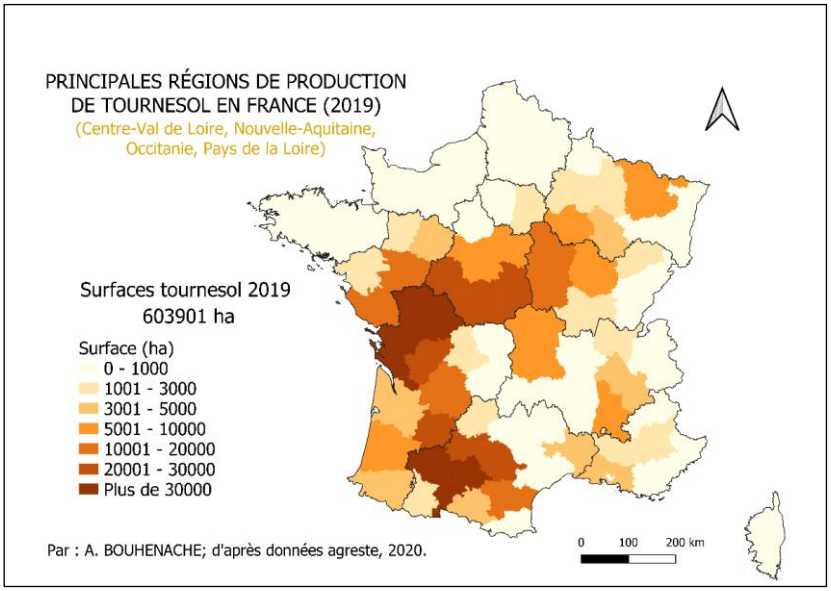

Figure 3. Principales régions de production du tournesol en France 2019. Source : auteur.

2. Les maladies du tournesol

Les maladies du tournesol représentent une des principales contraintes qui influent sur la stabilité de la production de cette culture dans le monde (Maširević, 2016). Kaya *et al.* (2012) rapportent plus de 30 agents pathogènes différents attaquant le tournesol, mais uniquement certains d'eux causent des dégâts économiques importants. Ainsi, l'importance relative de maladies spécifiques varie selon la région géographique. Les différences de climat, de distribution des pathogènes et de pratiques culturales affectent la fréquence et la dominance des maladies dans chaque région (Markell *et al.*, 2015). Selon la nature de l'agent causal, toutes les maladies du tournesol peuvent être classées en mycoses, bactérioses et viroses en plus des mauvaises herbes parasites (Aćimović, 1998). Les maladies les plus importantes dans le monde sont le Sclérotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*), le Phomopsis (*Phomopsis helianthi*), la rouille (*Puccinia helianthi* Schwein) et le mildiou (*Plasmopara halstedii*). Elles affectent la culture à différents stades de croissance (Fig. 4) (Miladinović *et al.*, 2019).

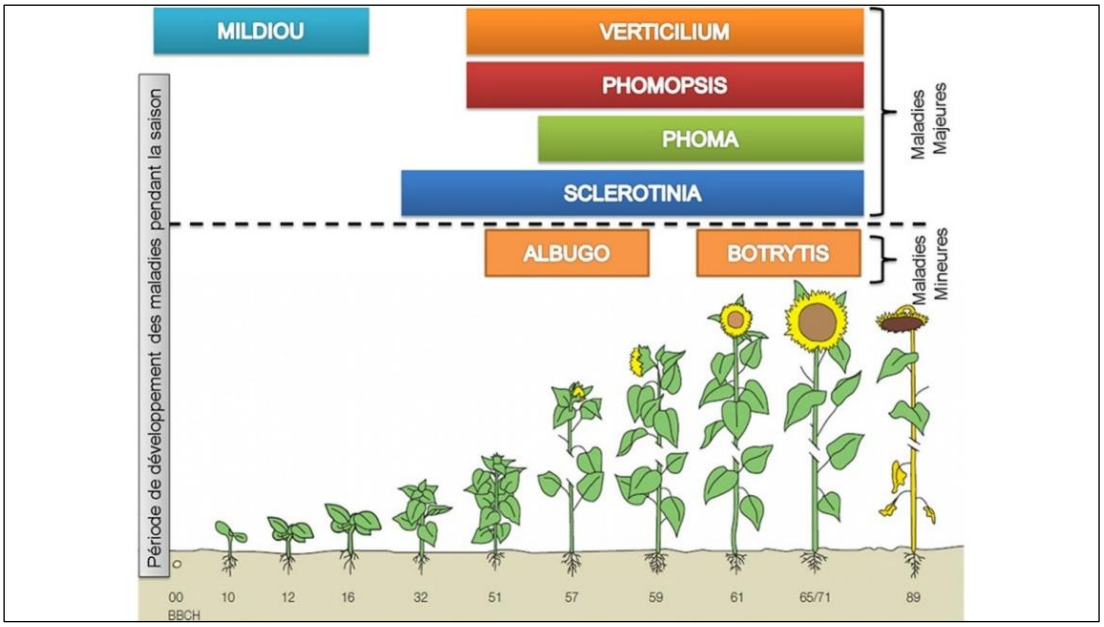

Figure 4. Les principales maladies du tournesol par stade de développement. Source : agro.basf.fr (2020)

En France, la culture du tournesol est soumise à une douzaine de champignons phytopathogènes. Les quatre maladies pour lesquelles le risque moyen national de pertes du rendement est le plus élevé sont le phoma (*Phoma macdonaldii*), le mildiou, le phomopsis, le sclérotinia et le verticilium (*Verticillium dahliae*) (Aubertot Jean-Noel *et al.*, 2007; Debaeke *et al.*, 2017a). On assiste aussi à des dégâts importants causés par les oiseaux et les gibiers lors de la phase d'implantation (Cellier *et al.*, 2018).

Pour éviter (ou tout au moins limiter) les dégâts (symptômes) et les dommages (pertes de rendement et de qualité de la récolte) sur la culture, il est possible d'intervenir à trois niveaux :

- Éviter l'apparition du risque
- Empêcher le risque de se réaliser
- Freiner l'apparition des dégâts et dommages (Delos *et al.*, 2004).

Il existe cinq catégories de moyens de lutte contre les bioagresseurs (ravageurs, maladies, adventices) : la lutte génétique (par choix variétal), la lutte chimique, la lutte physique (ex : désherbage mécanique), la lutte biologique (ex : *Coniothyrium minitans* contre le sclérotinia) et la lutte agronomique (Mestries *et al.*, 2011).

A. *Le phomopsis*

a] Une maladie majeure du tournesol

Le phomopsis est une maladie cryptogamique dont l'agent causal est *Diaporthe helianthi* (anamorphe: *Phomopsis helianthi* ; Muntanola-Cvetkovic *et al.* (1981)). Identifié la première fois en Yougoslavie en 1980 (Mihaljčević *et al.*, 1985), le phomopsis s'est ensuite propagé en Europe et en Amérique du Nord et du Sud et est devenu une menace sérieuse pour la production du tournesol causant des pertes de rendement allant jusqu'à 50 % et des réductions de la teneur en huile jusqu'à 25% du moins avant l'apparition de variétés tolérantes au cours des années 90 (Masirevic et Gulya, 1992).

En France, le phomopsis a été observé pour la première fois en 1984 sur des parcelles du Lauragais dans la région de Toulouse (sud-ouest de la France). Puis, il s'est répandu et il est devenu la maladie la plus grave sur l'ensemble de la région française de tournesol à partir de 1992 à 1993 (Delos et Moinard, 1995) particulièrement dans le bassin de production sud-ouest (Fig. 5).

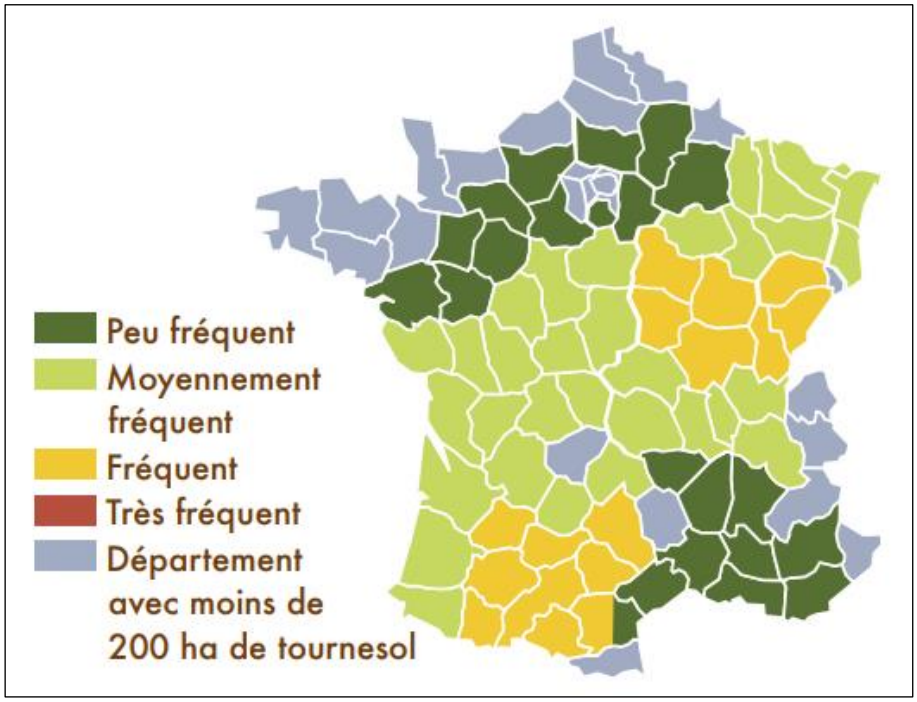

Figure 5. Répartition régionale du risque phomopsis. Source : Guide de culture de tournesol Terresinovia 2020

b] Cycle biologique du champignon

Le phomopsis appartient à la famille des *Diaporthaceae*, à l'embranchement des Ascomycètes (*Ascomycota*). Il existe à la fois sous formes téléomorphe et anamorphe qui se succèdent pendant son cycle biologique (Fig. 6) :

- la forme anamorphe (imparfaite ou non sexuée) sous le nom de *Phomopsis helianthi* qui produit des pycnides pour assurer la survie du champignon.

- la forme téléomorphe (parfaite ou sexuée) à laquelle il a été donné le nom de *Diaporthe helianthi* et qui produit des périthèces responsables de l'infection initiée sur les feuilles du tournesol.

Le champignon passe la période hivernale sous forme de mycélium sur les résidus de culture à la surface du sol. Le passage de la forme asexuée à la forme sexuée a lieu en automne. Les périthèces commencent à se former dès le mois de novembre mais leur développement est stoppé en hiver par le froid (Assemat et Fayret, 1987). La maturation est conditionnée par la température et l'hygrométrie et peut avoir lieu dès le mois de février. Une température de 10 °C associée à une hygrométrie supérieure à 85 % sont suffisantes pour initier une maturation. Huit ascospores se développent à l'intérieur de chaque asque pendant le processus de maturation au printemps (Vedy-Zecchini *et al.*, 2018).

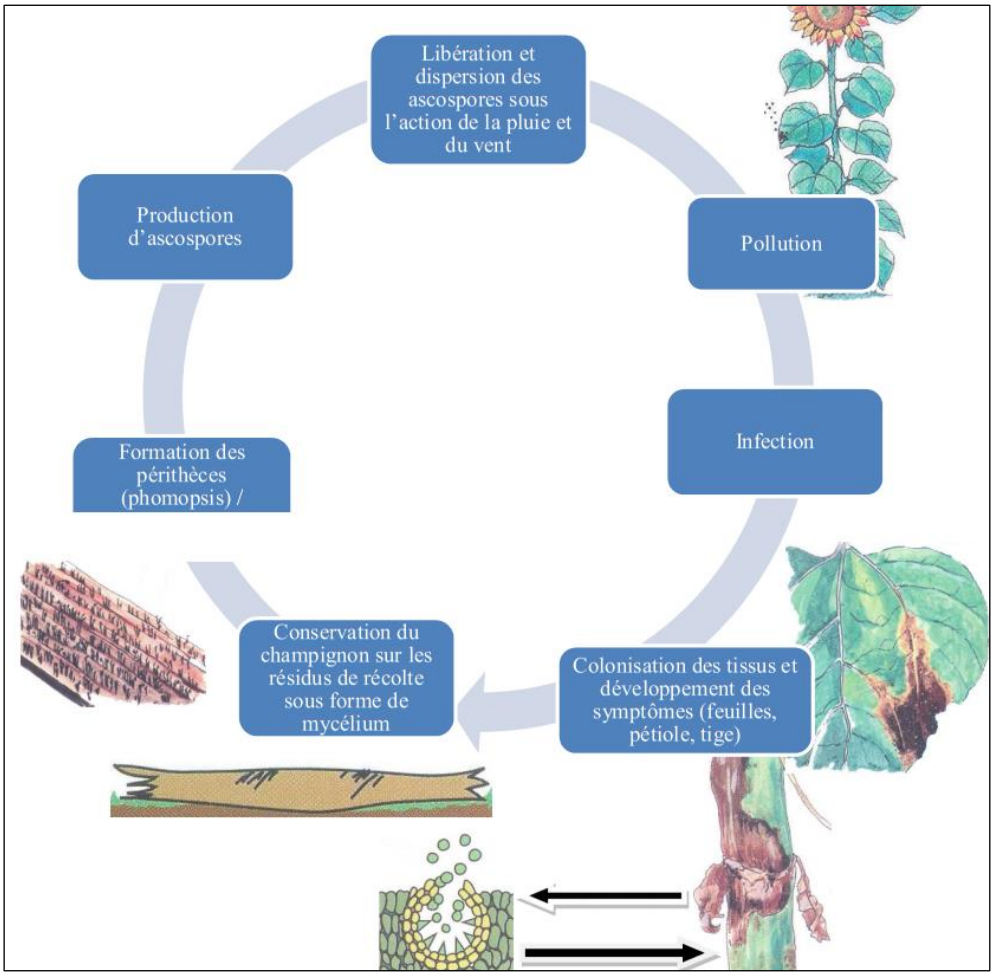

Figure 6. Cycle biologique de phomopsis. Modifié d'après Desanlis (2013)

c] Dispersion des ascospores et infection

La projection des ascospores est favorisée par la pluie et le vent. Il est estimé que 0.5 mm de pluie suffisent à provoquer des contaminations significatives dès que le pourcentage d'asques mûrs atteint ou dépasse 50 %, avec des températures supérieures à 6 °C et une humidité relative élevée. De ce fait, lorsque le printemps est doux et pluvieux, les premières projections d'ascospores peuvent avoir lieu dès février (Bordat *et al.*,

2011). La germination peut s'achever entre 15 et 22°C pour la majorité des spores et celles-ci gardent leur pouvoir germinatif pendant une dizaine de jours (Davet, 1991).

Comme pour la pollution par les spores, les variables climatiques notamment l'humidité relative jouent fortement sur la réussite des événements d'infection (Délos et Moinard, 1996). Une humidité relative de 90% doit être maintenue pendant au moins 10 à 12 h pour que l'infection foliaire réussisse (Gulya *et al.*, 1997). Une infection typique commence au bord des feuilles puis se propage le long des nervures secondaires puis la nervure principale de la feuille via les pores des hydathodes (Desanlis *et al.*, 2013). La phase la plus sensible et réceptive aux ascospores se situe entre le bouton floral et le début de la floraison (Delos et Moinard, 1995). La longueur du limbe, le couvert végétal (à travers la sensibilité génotypique, la densité de plantes, la nutrition azotée et la disponibilité de l'eau) sont des facteurs qui influencent le développement du champignon sur la plante comme démontré dans le travail de Desanlis *et al.* (2013).

d] Symptômes, dégâts et lutte

La caractéristique la plus discriminante est une bande de tissu nécrotique sur la veine bordée de tissu chlorotique. La lésion foliaire crée souvent un aspect « bronzé » sur la feuille et dégrade rapidement le quadrant foliaire initialement infecté. Les symptômes foliaires initiaux (Fig. 7) ne sont pas à confondre avec le stade précoce d'infection des feuilles par Verticilium, où la zone nécrotique se situe entre et non sur les veines (Markell *et al.*, 2015).

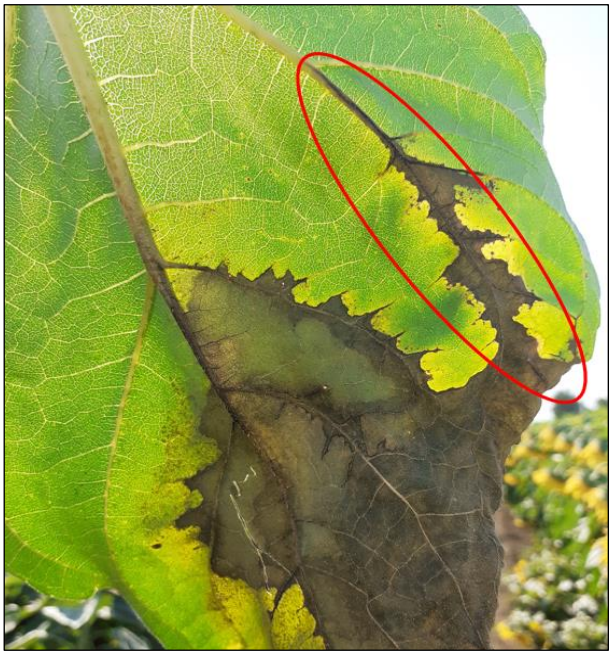

Figure 7. Symptôme typique de phomopsis sur feuille de tournesol. Source : auteur.

L'infection se poursuit le long du pétiole et, en atteignant la tige, elle produit une lésion brune claire à brune foncée qui peut atteindre plus de 15 cm de longueur parfois. Cette lésion finit par une pourriture de la moelle, ce qui conduit soit à la verse (Fig. 8) avec l'augmentation du poids de la tête du tournesol soit à la rupture du transfert hydrique au sein de tige provoquant une sénescence accélérée (Markell *et al.*, 2015). La sévérité du phomopsis (appelé aussi chancre de la tige) est souvent évaluée par le nombre final de taches encerclantes par plante dans les essais d'évaluation variétale mais aussi par le pourcentage de tiges avec ces symptômes dans les parcelles agricoles (Pinochet, 1995). Ces taches perturbent -voire interrompent- la circulation de sève pendant le remplissage des akènes et sont donc responsables des pertes de rendements

et de qualité de la récolte. Le passage vers la tige par le pétiole peut être empêché si ce dernier est nécrosé par le phoma (*Phoma macdonaldii*) d'où une interaction entre ces deux champignons.

Figure 8. Tige cassée suite à une attaque de phomopsis. Source : terresinovia.fr

Aujourd'hui, l'utilisation de génotypes tolérants est un bon moyen pour réduire les dommages causés par cette maladie. Les méthodes de lutte agronomiques ont été rapportées dans plusieurs études. L'enfouissement profond des résidus de récolte avec un retour de la culture tous les 3 à 4 ans sur la même parcelle sont nécessaires pour limiter l'inoculum primaire. Walcz et Nébli (2006) ont constaté que les périthèces, même exposés aux conditions extérieures pendant 3 ans, produisaient des ascospores viables, ainsi que quelques pycnides. Les effets de la conduite de culture sur la fréquence et la gravité des attaques de phomopsis ont été démontrés dans le travail de Debaeke *et al.* (2003) : « La densité de peuplement augmente la proportion de tiges présentant des taches de phomopsis. Par contre, l'augmentation des doses d'azote peut se traduire dans certaines conditions par une diminution de la fréquence de tiges attaquées. Le retard de semis réduit le risque de contamination foliaire et de dégât sur tige ». L'idée est de raisonner la combinaison de ces facteurs pour empêcher un développement excessif du couvert végétal, sans pénaliser le rendement.

Le recours aux fongicides est parfois conseillé pour lutter contre le phomopsis lorsqu'une attaque sévère est prévisible. Dans les faits, le pourcentage de parcelles traitées aux fongicides était de 10 % en 2019 et de 18 % en 2017 (source : enquêtes Terres Inovia). La décision de traiter tient compte du risque phomopsis dans la région, de la variété choisie et de la situation de la parcelle. En France, les bulletins de santé du végétal (BSV) qui prévoient la première période de contamination en fonction des conditions climatiques via l'utilisation du modèle ASPHODEL représentent le premier système d'alarme contre la maladie. Le fait que *D. helianthi* puisse être distribué avec les graines souligne l'importance des mesures phytosanitaires dans la production et le commerce des semences (Virányi, 2008).

B. *Le mildiou*

Le mildiou du tournesol, provoqué par *Plasmopara halstedii* (Farl.) est considéré comme l'une des maladies fongiques les plus graves de cette culture dans le monde (Berlese et De-Toni, 1888). Au contraire des autres maladies, *P. halstedii* a plus de 80 hôtes dont 35 de la famille des Astéracées, y compris des adventices (Harveson, 2011). Cette maladie a été signalée pour la première fois en France en 1966 et elle touche l'ensemble des régions de production de tournesol (Desanlis, 2013). Les infections causées par le mildiou peuvent être classées en deux grandes catégories en fonction des symptômes. Les symptômes systémiques se produisent lorsque les jeunes plants sont infectés par le système racinaire, entraînant souvent la mort des

plantes (Harveson, 2011). Si les plantules survivent, elles subissent un ralentissement de croissance important (nanisme) avec des taches chlorotiques le long des nervures et un feutrage blanc sur la face inférieure des feuilles (Fig. 9).

Figure 9. Symptômes du mildiou sur la plante et la feuille de tournesol. Source : auteur

Le champignon se conserve dans le sol sous forme d'oospores, qui sont des structures à parois épaisses qui se forment dans les tissus racinaires peu de temps après l'infection. Ceux-ci servent également de structures de survie. Ils sont très résistants aux conditions environnementales défavorables et sont capables de rester dormants dans les sols jusqu'à 10 ans (Gulya *et al.*, 1997).

Les pertes de rendement dues au mildiou dépendent de l'incidence et de la répartition du pathogène dans les sols, du pourcentage de plantes infectées et de conditions météorologiques notamment autour du semis (Gulya *et al.*, 1997). On estime que 50 mm de précipitations avec une température du sol supérieure à 10 °C dans les dix jours encadrant le semis sont des conditions favorables à l'installation du champignon (Mestries *et al.*, 2011). Les taux d'attaques sont très variables. Cependant, lorsque des foyers très concentrés dans une parcelle sont infectées, on peut s'attendre à une réduction de la taille des capitules avec des graines plus légères et des pertes de teneur en huile (Markell *et al.*, 2015). A moins de compensation partielle, on peut penser que la perte de rendement est quasi proportionnelle au % de plantes touchées à partir d'un certain seuil. De fortes chutes de rendement sont constatées lorsque 80 % des plantes sont nanifiées ou détruites (Desanlis, 2013).

La figure 10 illustre la répartition géographique de la maladie en France. Le mildiou était classé comme maladie de quarantaine pendant longtemps mais son statut a changé avec l'entrée en vigueur le 14 décembre 2019 d'un nouveau règlement relatif à la santé des végétaux (règlement UE/2016/2031) : il est devenu un organisme réglementé non de quarantaine. La lutte contre le mildiou est génétique essentiellement car très efficace avec le panel de variétés résistantes disponibles aujourd'hui (Mestries *et al.*, 2011). Cependant, elle doit intégrer une combinaison de l'ensemble des moyens de gestion durable pour limiter son développement sur tournesol (agronomique, chimique…) et assurer la durabilité des résistances (Desanlis, 2013). En effet, de nouvelles races de mildiou apparaissent périodiquement sur le territoire.

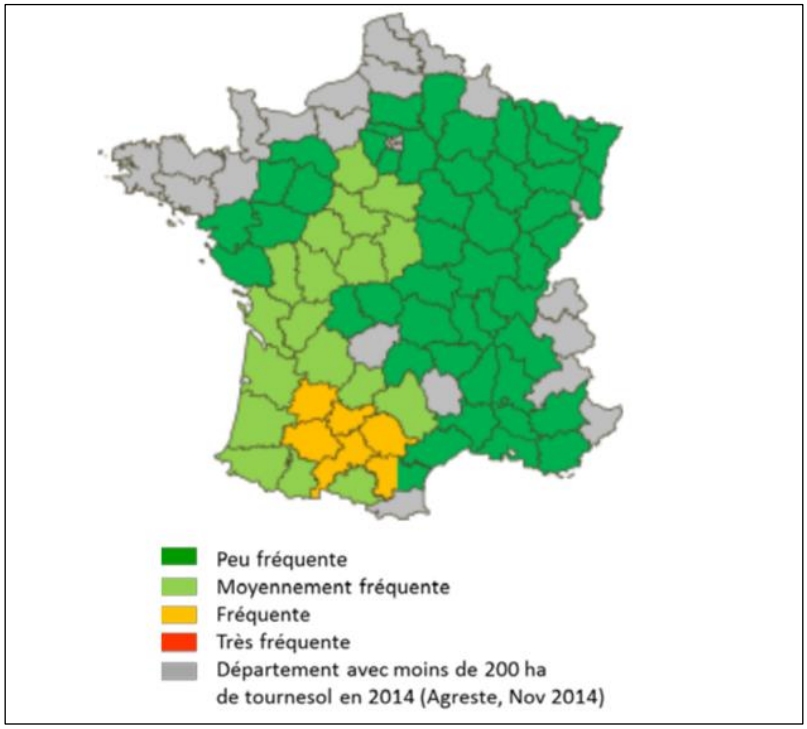

Figure 10. Répartition régionale du risque mildiou. Source : d'après Mestries *et al.*, 2015

C. *Le sclérotinia*

Sclerotinia sclerotiorum (Lib.) de Bary a été décrit pour la première fois en 1837 comme agent pathogène du tournesol. Le champignon est considéré comme un pathogène majeur du tournesol et est répandu dans toutes les régions de production de tournesol. Le sclérotinia peut aussi attaquer de nombreuses cultures. Il est capable de se conserver pendant de longues années dans le sol sous forme de sclérotes.

Ce champignon est à l'origine de plusieurs symptômes et provoque plusieurs formes de la maladie selon l'emplacement et le mécanisme d'infection sur les organes de la plante : collet, bouton, feuille/tige et capitule. Le sclérotinia sur capitule, forme la plus redoutée et la plus commune de la maladie, cause le plus de dégâts sur la culture (Markell *et al.*, 2015). L'infection peut être observée sous forme de petites taches humides à l'arrière du capitule qui grossissent rapidement et deviennent de couleur beige provoquant ainsi sa pourriture (Markell *et al.*, 2015). La libération d'ascospores, la croissance du mycélium et l'infection sont favorisées à des températures comprises entre 20 et 25 °C, bien que chacune puisse se produire dans une plage de températures plus large (Gulya *et al.*, 1997). L'humidité élevée du sol favorise la germination des sclérotes. La présence d'eau libre est aussi nécessaire pour réussir l'infection (Masirevic et Gulya, 1992). Les régions de production les plus touchées en France (Fig. 11) se situent dans la partie nord (Poitou-Charentes, Centre), les pertes de rendements peuvent atteindre 50 % dans certains cas (Desanlis, 2013).

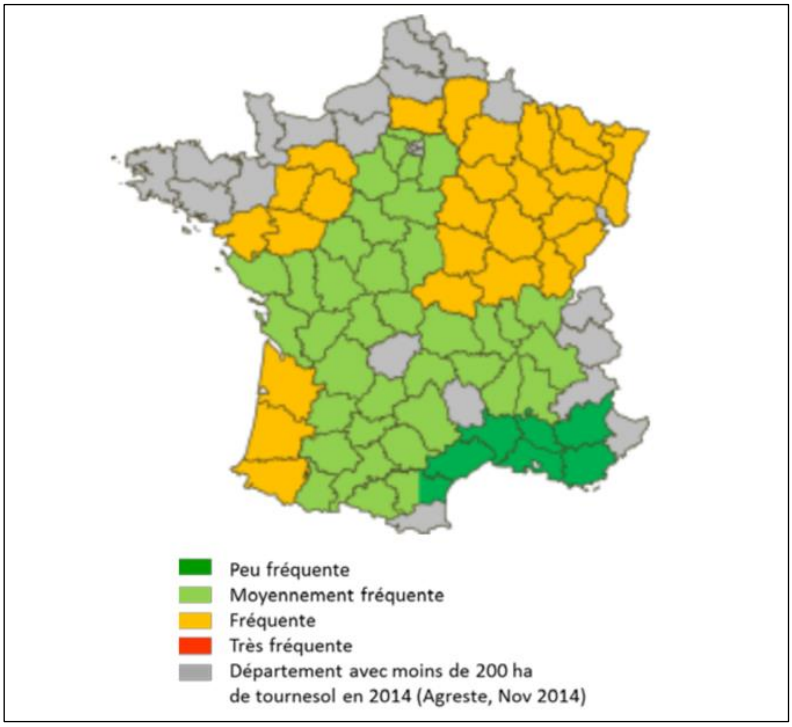

Figure 11. Répartition régionale du risque sclérotinia capitule. Source : d'après Mestries *et al.*, 2015

Le sclérotinia est parmi les maladies les plus difficiles à gérer, la résistance génétique n'est que partielle. Les fongicides ont une efficacité limitée et ne sont pas employés en pratique. L'application de mesures agronomiques adaptées telle que la rotation et la gestion de travail du sol pour réduire l'inoculum primaire sont préconisées (Mestries *et al.*, 2011; Markell *et al.*, 2015).

3. Le changement climatique et la nécessité d'adaptation en agriculture

A. *Le changement climatique et l'agriculture*

Depuis quelques décennies, le changement climatique est devenu un enjeu majeur et préoccupant dans les communautés scientifiques. Au XXe siècle, les augmentations de température moyenne liées essentiellement aux activités anthropiques sont estimées à environ 0,6 °C à l'échelle du globe et de plus de 1 °C en France. A l'horizon 2100, cette augmentation sera de l'ordre de 3 à 3,5 °C dans l'hexagone pour le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5) par rapport à une moyenne de référence 1976-2005 (Fig. 10) selon les prévisions extraites de DRIAS (Ouzeau *et al.*, 2014). Les précipitations sont quant à elles, supposées diminuer notamment en période estivale (Fig. 12). Cette estimation des tendances d'évolution est associée à une forte incertitude sur la distribution de ces changements (Ouzeau *et al.*, 2014).

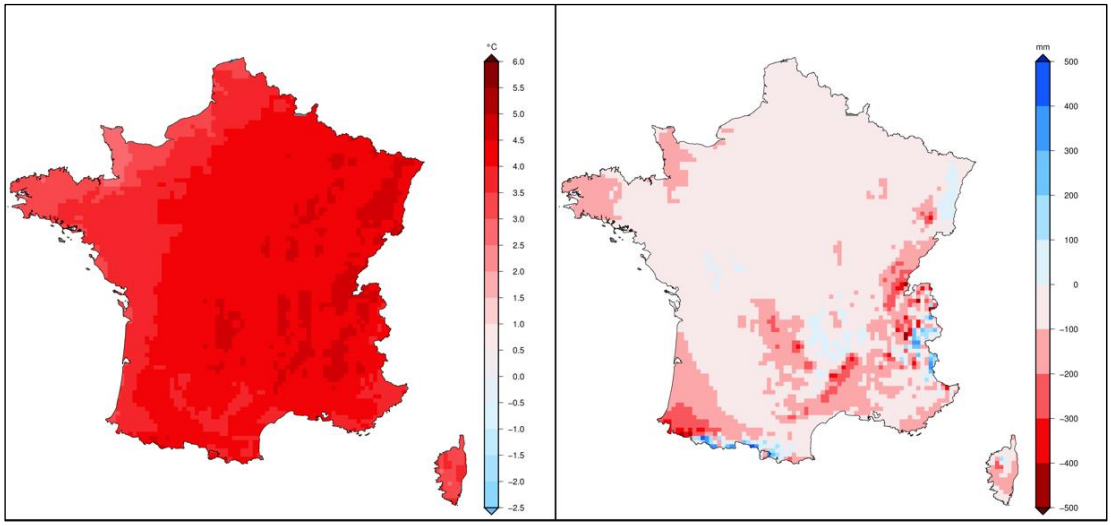

Figure 12. Anomalie des moyennes annuelles de précipitations et de température : écart entre l'horizon lointain (2070-2100) et la période de référence (1976-2005). Scénario sans politique climatique (RCP 8.5). Source : DRIAS

Ces tendances du changement climatique déjà évidentes, la forte probabilité de futurs changements et l'ampleur croissante de leurs impacts en agriculture renvoient sur l'urgence d'identifier et d'évaluer les options d'adaptation au changement climatique dans les prochaines décennies (Howden *et al.*, 2007). Le but de cette adaptation est de gérer efficacement les risques climatiques potentiels. Le terme «adaptation» peut désigner les actions d'ajustement des pratiques et options techniques en réponse à la réalité et à l'environnement naturel, ou des changements de processus et des structures sociales et institutionnelles en réponse à l'environnement décisionnel (Parry *et al.*, 2007). Ainsi, les options d'adaptation potentielles disponibles pour un changement marginal des systèmes agricoles existants sont nombreuses, mais elles ne sont jugées efficaces que sous un changement climatique modéré. Par conséquent, des changements plus systémiques doivent être envisagés, avec la prise en compte d'autres facteurs de risque (Howden *et al.*, 2007).

B. *Le tournesol et le changement climatique : vulnérabilité et adaptation*

Malgré sa réputation de culture d'été modérément tolérante à la sècheresse, le tournesol pourrait être très vulnérable à l'effet direct du stress thermique et de la sécheresse pendant son cycle d'où une perte sévère de rendement, une diminution de la teneur en huile et la dégradation possible de certains acides gras (Debaeke *et al.*, 2017b; Miladinović *et al.*, 2019). Les impacts du changement climatique sur la culture ont été démontrés dans plusieurs études notamment celles de Donatelli *et al.* (2012) et Debaeke *et al.* (2017b). La figure 13 illustre les baisses potentielles de production prévues par l'analyse AVEMAC (Donatelli *et al.*, 2012) dans diverses zones (sud et est de l'Europe) et sous deux scénarios de limitation d'eau à l'horizon de 2030. Lorsqu'aucune stratégie d'adaptation n'est envisagée, le rendement du tournesol montre une légère augmentation pour les latitudes nord, mais avec des baisses fortes aux latitudes sud, ce qui est généralement admis. Par contre cela dépend fortement des scénarios climatiques envisagés comme le montre la figure 13.

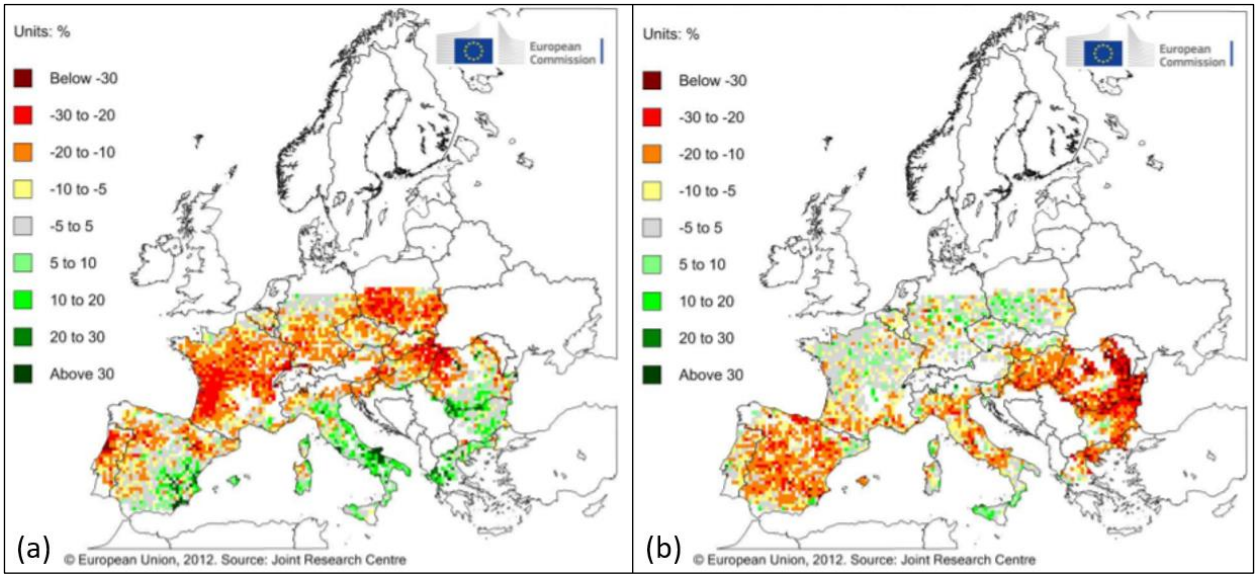

Figure 13. Variation relative de rendement du tournesol dans des conditions non irriguées en 2030 en utilisant la réalisation « chaude » (a) et « froide » (b) du scénario A1B, sans stratégie d'adaptation envisagée. Source : Donatelli *et al.*, (2012)

D'après Debaeke *et al.* (2017b), les principales voies d'adaptation de la culture au changement climatique consistent en :

- la sélection génétique par création de variétés précoces et de variétés tolérantes à la sécheresse - l'ajustement des itinéraires techniques en jouant principalement sur la date de semis (stratégie d'esquive)

- la délocalisation de la culture vers le nord.

A cela, on peut ajouter des stratégies d'irrigation d'appoint autour de la floraison et la culture en dérobée pour profiter des opportunités d'allongement de la période de végétation annuelle.

4. La modélisation des maladies des cultures dans un contexte de changement climatique : enjeux et défis

Le développement et l'utilisation de modèles sont des prérequis incontournables pour étudier l'évolution de systèmes complexes, avec de multiples interactions, sous l'effet de climats futurs (Launay, 2019). Les modèles épidémiologiques mécanistes quant à eux, formalisent la connaissance sur le pathogène en relation avec son hôte. Dans ce type de modèles, les mécanismes de développement du pathogène sont décrits avec précision (conservation, infection, cycle de développement, etc…). L'approche climatique est privilégiée. Par exemple, l'infection aura lieu si les conditions d'humidité relative et de températures requises sont présentes. Une seule maladie est prise en compte par modèle généralement (Robin, 2013).

Le changement climatique affecte les bioagresseurs non seulement directement mais aussi indirectement par ses effets sur le pathosystème. Par conséquent, les modèles de culture sont fréquemment inclus dans les évaluations d'impact du changement climatique pour les maladies des cultures afin de permettre de déduire les interactions entre la phénologie des cultures et le développement des agents pathogènes et d'examiner les impacts des maladies sur le rendement des cultures (Newbery *et al.*, 2016). Dans cette optique, l'approche de couplage de modèles (ensemble multi-modèles) a été rapportée dans plusieurs études comme pertinente pour générer des tendances solides pour l'évolution future des risques de maladies de cultures (Skelsey et Newton, 2015; Kim et Cho, 2016; Launay *et al.*, 2020)

Dans le cas du tournesol, l'utilisation des modèles épidémiologiques mécanistes avec des modèles climatiques a été recommandée par Mehrabi *et al.* (2019) pour mieux comprendre la propagation des pathogènes dans un contexte futur. Plusieurs modèles ont été développés pour les maladies du tournesol telles que le phomopsis et le phoma (Debaeke et Chabanis, 1999; Debaeke et Estragnat, 2003;

Debaeke *et al.*, 2014). Les options de modélisation telle qu'une approche mécanistique et dynamique, basée sur le couplage de modèles épidémiologiques avec un modèle de culture (Casadebaig *et al.*, 2011) ou une approche qualitative basée sur l'expertise et la littérature (Aubertot Jean-Noël et Robin, 2013), permettent à la fois de représenter les interactions entre les agents pathogènes composant le complexe parasitaire du tournesol tout en se complétant (Debaeke *et al.*, 2017a).

Toutefois, ces ambitions de modélisation des maladies des cultures – de surcroît couplées à la conduite de culture - n'ont pas encore abouti de manière opérationnelle en tournesol et de nombreux défis s'imposent toujours. D'après Cunniffe *et al.* (2015), les différents aspects de la biologie complexe liée à la propagation rendent la calibration des modèles difficiles. Le même auteur rapporte toute une série de contraintes de ce type de modélisation tel que le taux d'infection fortement contrôlé par les conditions environnementales, les maladies fréquemment cryptiques (c'est-à-dire indétectables) et/ou mal signalées et les interactions hôtes/agents pathogènes qui demeurent complexes et très peu compréhensibles.

5. Evaluation de la durabilité des systèmes de culture

A. *L'évaluation multicritère ex-ante*

Un système de culture est par définition un ensemble de modalités techniques mises en œuvre sur une unité de surface (parcelles ou ensemble de parcelles) de manière identique. Chaque système se définit par la nature des cultures et leur ordre de succession ainsi que par les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures (Sebillotte, 1990). Dans le contexte actuel et futur, il est nécessaire de concevoir des systèmes de culture innovants, c'est-à-dire confrontés à de nouveaux défis (réduction des intrants, changement climatique) en vue d'une agriculture durable (Pelzer *et al.*, 2012). Cette notion de durabilité holistique et multidimensionnelle et qui englobe des objectifs économiques, sociaux et environnementaux (Sadok *et al.*, 2009) exige pour son évaluation l'utilisation d'une approche multicritère prenant en compte ces différentes composantes (Deytieux *et al.*, 2016).

L'évaluation multicritère est définie par Doumpos et Zopounidis (2002) comme « un outil d'aide à la décision qui permet de classer plusieurs alternatives en ordre de préférence sur la base de plusieurs critères dont les unités peuvent être différentes ». Ainsi, l'évaluation multicritère de la performance des systèmes de culture innovants *ex ante* (c'est-à-dire au préalable) a pour objectif de déterminer les impacts probables des interventions et stratégies d'adaptation envisagées qui sont au cœur de la transition nécessaire de ces systèmes (Pelzer *et al.*, 2012). Ces méthodes et outils d'évaluation multicritère de la durabilité construisent ou reposent généralement sur des ensembles d'indicateurs (Ness *et al.*, 2007) qui prennent en compte le contexte pédoclimatique et socio-économique (Sadok *et al.*, 2008; Pelzer *et al.*, 2012). L'enjeu d'une évaluation multicritère est donc de trouver la solution la plus adéquate à un problème à plusieurs dimensions, avec des performances pouvant être contradictoires. Ceci correspond à notre objectif final dans cette étude qui est d'identifier, pour la filière tournesol les meilleures stratégies d'adaptation au changement climatique en fonction de leurs performances agronomiques et environnementales tout en prenant en compte les impacts prévus des maladies.

B. *La méthodologie DEX et la modélisation multi-attributs qualitative*

DEX (Decision EXpert) a été inventé il y a plus de 30 ans par Bohanec et Rajkovič (1990). C'est une méthodologie qualitative d'aide à la décision pour l'évaluation et l'analyse des alternatives de décision. Elle représente une approche pionnière de la combinaison de la modélisation numérique multicritère « classique » avec les systèmes d'expertise à base de règles. DEX a été implémenté dans trois générations de logiciels - appelés DECMAK, DEX et DEXi - et intégré à de nombreux autres plateformes et systèmes informatiques (Bohanec *et al.*, 2013).

Actuellement, les logiciels DEXi sortis en 2000, sont les plus utilisés. C'est un programme éducatif interactif pour MicroSoft Windows qui prend en charge la création et l'édition de modèles, l'acquisition

tabulaire de règles, l'évaluation d'alternatives basée sur un ensemble de critères de base, et une analyse et comparaison des options par simulation (Bohanec *et al.*, 2013).

En agriculture, DEXi a été utilisé pour la première fois par Bohanec *et al.* (2004) pour évaluer la durabilité écologique et économique des systèmes de culture à base de maïs OGM. DEXi a été employé pour la conception de MASC par Sadok *et al.* (2009) conduisant à un premier outil relativement opérationnel pour faciliter l'usage de l'évaluation multicritère dans la perspective de répondre aux enjeux du développement durable. La communauté des agronomes français a mis au point plus d'une dizaine de modèles hiérarchique qualitatifs pour évaluer la durabilité en utilisant le logiciel d'aide à la décision DEXi (Craheix *et al.*, 2015). Pelzer *et al.* (2012) ont développé un modèle décisionnel sur DEXi (DEXiPM) pour une évaluation *ex ante* de la durabilité des systèmes de culture, en particulier avec une gestion intégrée des cultures et une utilisation limitée des pesticides. Le modèle a révélé une grande pertinence pour susciter les discussions lors de la conception de systèmes de culture innovants sur la base de leur diagnostic de points forts et de faiblesses.

Partie 2

Contexte et problématique

1. Contexte

A. *Contexte général et originalité du travail*

Le changement climatique affecte les écosystèmes naturels et agricoles du monde entier et a le potentiel d'affecter la sécurité et la stabilité alimentaire (West *et al.*, 2012). Son impact a gagné une attention croissante dans la littérature scientifique au cours des dernières décennies notamment en terme de stress abiotiques (Donnelly *et al.*, 2011). Ainsi, différentes filières réfléchissent collectivement aux meilleures stratégies pour répondre à l'augmentation des stress abiotiques (thermiques et hydriques principalement) que vont subir localement les principales cultures d'hiver et de printemps. Cependant, peu de travaux ont été réalisés sur les effets du changement climatique sur les maladies de cultures. L'ignorance des facteurs biotiques désinforme le débat sur le changement climatique et la sécurité alimentaire (Boonekamp, 2012; West *et al.*, 2012). Comme l'apparition de l'infection dépend de la relation entre les trois composantes principales du pathosystème (agent pathogène, hôte et conditions environnementales) sur lesquelles le changement climatique a un grand effet (Zayan, 2019), ce dernier devrait non seulement causer des pertes de récoltes plus graves, mais aussi diminuer la capacité d'atténuation dans les agrosystèmes par les stratégies d'adaptation envisagées (Boonekamp, 2012).

Dans ce contexte, l'anticipation de l'état futur de risques sanitaires doit être intégrée dans l'évaluation des leviers d'adaptation des systèmes de culture. Des approches plus ou moins intégratives, telles que des modèles épidémiologiques basés sur les processus qui simulent l'effet des conditions météorologiques peuvent ouvrir une piste. Ces outils doivent être calibrés sur des données climatiques du passé puis pilotés par les variables climatiques futures pour fournir une estimation des risques pour diverses maladies de cultures (Launay *et al.*, 2014; Launay *et al.*, 2020). Le tournesol est une culture typique pour adresser ces questions spécifiques des impacts du changement climatique sur les risques de maladies. Cette espèce oléagineuse de grande importance économique et écologique en France et dans le monde, est souvent simultanément mise à l'épreuve par différents stress biotiques et abiotiques (Miladinović *et al.*, 2019). Des impacts directs ou indirects du changement climatique sur les pathosystèmes du tournesol sont attendus. Mais des leviers d'adaptation tel que le déplacement de la culture vers le Nord peuvent atténuer ces impacts. L'utilisation de multi-modèles de croissance et d'épidémiologie en tenant compte des pratiques culturales peut nourrir des évaluations de scénarios d'adaptation au changement climatique pour cette filière (Debaeke *et al.*, 2017b).

Enfin, et pour identifier les stratégies d'adaptations les plus prometteuses, une approche multicritère est nécessaire afin d'englober les différents enjeux de performance des adaptations (Deytieux *et al.*, 2016). Différentes méthodes et outils d'évaluation multicritères sont disponibles et peuvent être mobilisés, en impliquant différentes parties prenantes de manière à discuter de leurs préférences dans le cas d'éventuels aspects contradictoires entre objectifs de production, environnement et santé des cultures.

B. *Le projet OPERATE*

Porté par l'INRAE, et associant Arvalis-Institut du végétal, Terres Inovia et l'ACTA, le projet OPERATE « crOP disEase Response to climATE change adaptation » initié en 2018 vise à apporter des réponses à une problématique nouvelle et clef : est-ce que les stratégies d'adaptation des systèmes de culture au changement climatique présentent des vulnérabilités inattendues au niveau des risques sanitaires ? OPERATE vise à analyser et à évaluer les relations entre les stratégies d'adaptation au changement climatique (stress abiotiques) et le développement de maladies (stress biotiques) de trois grandes cultures : blé tendre, tournesol et pomme de terre. Le projet aborde ces questions à moyen et long terme pour les stratégies d'adaptation et le changement climatique, et à des échelles régionales et sectorielles pour la co-construction et l'évaluation des solutions. OPERATE mobilise des outils de modélisation et d'analyse multicritère, avec une approche intégrée et/ou systémique. Il fournit un cadre original pour quantifier les incertitudes en fonction des différents modèles de maladies impliqués, des scénarios d'émission (RCP) et

des horizons temporels. Il permet également d'analyser la complémentarité potentielle entre les approches de modélisation. Les données régionales de surveillance des bio-agresseurs et les acquis du projet CLIMATOR (2007-2010) fournissent un bon cadre pour les choix de modèles et les simulations.

Les principaux objectifs du projet se résument dans les point suivants : (i) identifier, prioriser et sélectionner, parmi l'expertise des acteurs et par filière, un ensemble de scénarios d'adaptations régionales aux contraintes générées par le changement climatique qui assurent une production suffisante, puis (ii) quantifier par modélisation quantitative et qualitative les impacts moyens de ces adaptations et leurs incertitudes, sur l'évolution de la production (P) et de l'environnement (E) d'une part, et sur l'évolution des risques sanitaires (H) des pathogènes majeurs d'autre part, pour (iii) enfin évaluer ces scénarios d'adaptation au moyen de méthodes d'analyse multicritères.

La présente étude correspond principalement au troisième objectif à atteindre pour la filière tournesol, tout en reconsidérant les autres objectifs.

C. *Pourquoi le tournesol dans cette étude ?*

Le projet OPERATE intègre 3 cas d'études : la pomme de terre, le blé tendre et le tournesol de manière à représenter un gradient de pression sanitaire. Le tournesol, comme décrit dans la section 1.D du présent document, relève d'une grande importance économique et environnementale. En outre, il est soumis à un cortège de bioagresseurs qui représentent la première contrainte pour sa production.

Sa distribution géographique actuelle sur le territoire national (au sud et sud-ouest) et le fait qu'il peut couvrir différentes exigences pédoclimatiques lui donne des possibilités d'adaptation très variées telle que l'extension vers le nord où les inocula n'existent pas encore. Avec son panel variétal très riche, la protection de la culture repose principalement sur le contrôle génétique en cohérence avec le contexte réglementaire et environnemental (e.g. plan Ecophyto II).

Enfin, et bien que le tournesol possède les caractéristiques d'une culture écologique, les innovations agroécologiques appliquées à cette culture n'ont pas été largement rapportées dans la littérature. Ceci fait penser que la culture du tournesol possède encore des leviers à explorer dans les stratégies d'adaptation pour améliorer la production dans des conditions contraintes (Debaeke *et al.*, 2017a). L'avenir du tournesol est donc probablement lié à son adaptation potentielle au changement climatique mais aussi à sa compétitivité et son attractivité pour s'imposer dans les systèmes de culture (Debaeke *et al.*, 2017b).

2. Problématique, hypothèses et démarche

Comme nous l'avons vu, des effets directs ou indirects, attendus ou inattendus du changement climatique et des stratégies d'adaptation à ce changement climatique sont susceptibles d'impacter les risques sanitaires pour la culture du tournesol. La prise en compte de ces risques doit être inclue dans l'évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique envisagées afin de rendre plus pertinente et complet leur évaluation et
priorisation par région.

Dans cette étude, l'accent sera mis sur les **maladies fongiques majeures** du tournesol comme risques sanitaires de la culture. Notre problématique est donc la suivante :

Quels sont les impacts des stratégies d'adaptation envisagées au changement climatique sur l'évolution future des maladies fongiques majeures du tournesol ? quel serait le poids de ces impacts sur la performance et la sélection des adaptations les plus prometteuses ?

A partir de cette problématique, plusieurs questions de recherche peuvent se décliner :

- Y aura-t-il plus ou moins de synchronisme entre les phases de contamination par les champignons pathogènes et les phases de sensibilité de la culture dans le contexte du changement climatique avec et sans adaptations ?

- Comment évolue l'exposition de la culture à ce risque de contamination entre les différents horizons temporels futurs ?
- Quelles seraient les meilleures stratégies d'adaptation par région d'après une évaluation multicritère intégrants les risques maladies ?

Pour répondre à ces questionnements, deux hypothèses sont émises :

- Au fil du temps, pour un même scénario d'adaptation, l'exposition de la culture au risque de contamination varie d'un horizon temporel à un autre et en fonction des maladies.
- En fonction des régions et horizons temporels, la prise en compte des risques de contaminations modifie les performances des scénarios d'adaptation et le choix du plus pertinent.

L'objectif général du stage est donc d'élaborer des indicateurs de risques pour les maladies fongiques qui peuvent résulter de différents scénarios d'adaptation au changement climatique pour la culture du tournesol. Ceci afin de pouvoir les intégrer ensuite dans un modèle décisionnel d'évaluation multicritère permettant de classer ces scénarios d'adaptation selon leur performance globale.

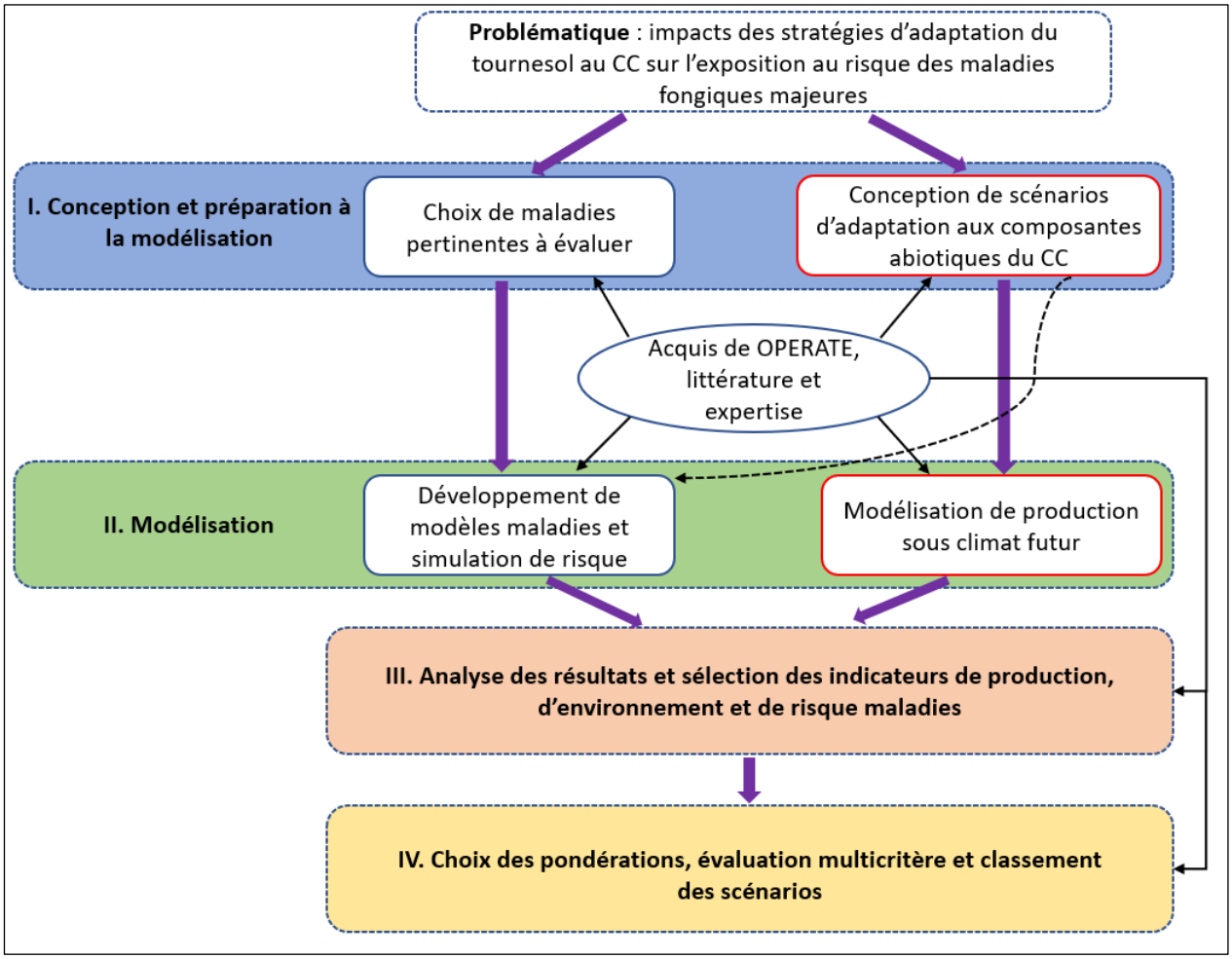

Figure 14. Schéma de la démarche générale. Source : Auteur
parties réalisées par Arrouze Mathilde en 2019

La démarche de travail proposée comprend quatre principales phases (fig. 14) :

- La phase de préparation à la modélisation dont l'objectif est d'une part de concevoir les scénarios de stratégies d'adaptation pour faire face aux stress abiotiques que va subir la culture de tournesol dans le contexte de changement climatique ; et d'autre part, de choisir des maladies fongiques d'intérêt pour évaluer les impacts des stratégies d'adaptation.
- La phase de modélisation par région et sous un climat futur de (i) la production de tournesol avec et sans stratégies d'adaptation avec un modèle de culture (SUNFLO), et du (ii) risque des

maladies (coïncidence entre les phases de sensibilité de tournesol et les phases de contaminations des agents pathogènes) sur la culture en fonction des stratégies d'adaptation à l'aides de modèles de prédiction développés et implémentés sur la plateforme X_Pest de l'INRAE.

- La phase d'analyse de résultats pour caractériser l'impact du changement climatique sur l'évolution de la production avec et sans stratégies d'adaptation, et l'impact de ces stratégies d'adaptation sur l'évolution des maladies choisies. Un ensemble d'indicateurs est ensuite sélectionné pour alimenter le modèle décisionnel d'évaluation multicritère.
- La dernière phase consiste à élaborer et implémenter un modèle décisionnel d'évaluation multicritère sous le logiciel DEXi, et à identifier les meilleures stratégies d'adaptation par région.

Chacune des phases est réalisé avec un recours aux acquis de projet OPERATE, à la littérature et aux experts de la filière,

Partie 3

Matériels et méthodes

1. Conception de scénarios d'adaptation

A. *Définition, échelles, et régionalisation*

Ce qu'on appelle « scénarios d'adaptation » au changement climatique dans ce rapport correspond à des itinéraires techniques (ITK) de la culture de tournesol. Ces itinéraires sont donc conceptualisés principalement à l'échelle de la parcelle avec peu d'interactions avec le système de culture (autres cultures précédentes et suivantes)

Les scénarios d'adaptation sont issus de la synthèse d'entretiens réalisés auparavant auprès d'agriculteurs dans le cadre du projet OPERATE sur les pratiques à adopter pour faire face au changement climatique. Les entretiens sont combinés avec un recours aux experts de la filière avant de formaliser les scénarios. Le travail de conceptualisation a été réalisé par Mathilde Arrouze lors de son stage à l'UMR AGIR en 2019.

En tenant compte de la répartition géographique actuelle de la culture et de la nature du changement climatique prévu sur le territoire français, la construction des ITK d'adaptation a été réfléchie en zone nord (où le tournesol est peu présent) et pour la moitié sud de la France où la culture fait partie du paysage. Deux ITK de référence ont donc été définis pour le nord et le sud et vont servir pour comparer la performance des ITK d'adaptation. Pour les deux régions, les ITK d'adaptation reposent sur 3 stratégies :

- L'esquive : elle consiste à mettre en place la culture de façon à ce qu'elle réalise son cycle hors les périodes de stress. Dans notre cas, c'est par semis précoce associé à une variété précoce.
- L'irrigation : elle consiste à réaliser deux tours d'eau de 30 à 35 mm, un avant la floraison et un en fin de floraison. Selon Champolivier *et al.* (2011) des apports d'appoint autour de la floraison peuvent compenser le manque de précipitations et augmenter significativement le rendement.
- La culture en dérobée : appelée aussi double culture, elle consiste à semer des variétés de tournesol à cycle très court entre deux cultures principales et après une culture d'hiver récoltée tôt. C'est une pratique qui est peu répandue actuellement mais pratiquée de façon régulière et avec succès surtout par des agriculteurs du Sud de la France disposant de l'irrigation (MARTIN-MONJARET, 2019). La double culture permet de générer un supplément de marge pour l'agriculteur.

B. *Les ITK construits*

Les ITK (référence et adaptations) diffèrent par :

- Le type de variété : très précoce (TP), précoce (P) ou mi-tardive (MT).
- La densité de peuplement : en se basant sur l'expertise et les guides et recommandations de Terres Inovia, elle varie de 55000 à 75000 plantes/ha selon la région et la stratégie considérée.
- La date de semis : il s'agit du 1er juillet pour les cultures dérobées, et entre le 20 mars et le 20 avril pour les autres ITK.
- L'irrigation : se divise en deux types : irrigation pour la levée autour du semis (dérobée) et irrigation d'appoint autour de la floraison. Les dates d'irrigation ont été estimées avec le modèle SUNFLO sur la base du temps thermique pour atteindre la date moyenne (au XXIème siècle) du stade floraison. Ainsi, les deux tours d'irrigation sont placés 10 et 15 jours avant et après floraison, respectivement pour les ITK concernés.
- La fertilisation azotée : varie entre 30 et 60 u/ha.

La fertilisation phospho-potassique, l'apport en Bore ainsi que le traitement herbicide sont considérés les mêmes pour tous les ITK. Leur effet n'est pas simulable par SUNFLO. Cependant pour le calcul économique, on considérera : 40 u de phosphore, 35 u de potassium, 450 g/ha de bore et 1 passage herbicide.

Le résumé des pratiques culturales par ITK est présenté dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1. Description des pratiques culturales pour les ITK de référence et d'adaptation par région.

Région	ITK	Stratégie	Type de variété	Densité de peuplement (p/ha)	Date de semis	Irrigation						Fertilisation N	
						Dose (mm)			Date			Dose (u)	Date
						N° 1	N° 2	N° 3	N° 1	N° 2	N° 3		
Nord	ITK1	Référence	P	75000	20-avr	0	0	0	/	/	/	60	20-mai
	ITK2	Esquive	MT	65000	05-avr	0	0	0	/	/	/	60	05-mai
	ITK3	Dérobée	TP	70000	01-juil	20	0	0	05-juil	/	/	30	05-juil
Sud	ITK2	Référence	MT	65000	05-avr	0	0	0	/	/	/	60	05-mai
	ITK4	Irrigation	MT	65000	20-mars	35	35	0	20-juin	20-juil	/	60	20-avr
	ITK5	Esquive	P	55000	20-mars	0	0	0	/	/	/	60	20-avr
	ITK6	Dérobée	TP	70000	01-juil	20	35	35	05-juil	01 août	15 août	30	05-juil

Source : D'après le rapport de Mathilde Arrouze (2019)

L'ITK 2 correspond à la référence sud et à la stratégie d'adaptation « esquive » au nord

- ITK2 Nord : on diminue un peu la densité de peuplement pour éviter une sur-consommation d'eau et parce que la variété est plus tardive
- ITK3 + ITK6 : l'apport d'azote est adapté à la diminution du rendement accessible
- ITK5 : on diminue la densité de peuplement pour atténuer le risque de sécheresse

2. Les maladies prises en compte

A. *Choix des maladies*

Comme nous l'avons vu dans la section 2 de la partie bibliographique, les maladies du tournesol sont nombreuses. Le degré de connaissances sur ces maladies cryptogamiques dans la littérature est variable. Les processus biologiques de développement sont bien déterminés pour certaines maladies et moins connus sur d'autres. Ainsi, le stade de sensibilité du tournesol diffère d'une maladie à une autre.

Compte tenu de la durée raccourcie du stage, nous nous sommes limités à trois maladies : le **mildiou**, le **phomopsis** et le **sclérotinia capitule**. Le choix a été basé sur le fait que ces trois maladies couvrent différents stades de sensibilité du tournesol ce qui permet de distinguer les différences qui peuvent résulter entre les ITK et de mieux diagnostiquer les impacts du changement climatique durant le cycle de la culture :

- Le mildiou : la période de sensibilité réceptivité est située dix jours autour du semis.
- Le phomopsis : la période de réceptivité est située entre le stade bouton étoilé (E1) et le stade floraison (F1) pour l'infection ; le passage de la feuille vers la tige se fait par contre entre floraison et maturité (M3). Ce sont donc les conditions pendant cette période qui seront à considérer pour l'expression des dommages.
- Le sclérotinia du capitule : la phase de réceptivité est cadrée par la fenêtre F1 et F1+200 DJ.

B. *Hypothèses et simplifications*

En général, une maladie cryptogamique évolue en trois principales phases sur une plante :

- La pollution : qui est la mise en contact des spores avec le peuplement végétal sans manifester aucun symptôme apparent. Elle est fonction de la quantité d'inoculum primaire qui dépend à son tour fortement de la nature des pratiques culturales (travail du sol, enfouissement des débris…) et des conditions climatiques favorables à la libération des spores.
- L'infection : également invisible, consiste à la pénétration du champignon dans les tissus des organes hôtes et à sa période d'incubation (développement du champignon à l'intérieur de la plante). Elle dépend du degré de contamination, du degré de résistance génétique et des conditions climatiques favorables.
- L'apparition et le développement des symptômes de la maladie (ou post-infection) : elle dépend du degré d'infection, de l'application ou non d'un fongicide et des conditions climatiques favorables.

La nuisibilité et l'incidence de la maladie dépendent donc de ces trois phases. Cependant, en consultant la littérature et l'expertise, on se rend compte qu'il y a plusieurs lacunes dans les connaissances de ces trois processus biologiques. Leur représentation pour l'ensemble des maladies s'avère donc compliquée. On a donc décidé de simplifier le problème de la manière suivante :

- Retenir les trois phases pour le phomopsis car les processus biologiques sont bien connus et on dispose d'un modèle de prédiction de la maturation des périthèces et de libération des spores : SimMat Diaporthe (Aubertot J *et al.*, 2006; Vedy-Zecchini *et al.*, 2018).
- Ne retenir que la phase d'infection pour représenter le risque de mildiou et de sclérotinia.

Donc pour simplifier, des **hypothèses** sont émises :

1. On admet que l'inoculum primaire n'est pas limitant pour les trois maladies et quelle que soit la situation géographique.
2. La phase de pollution n'est pas limitante pour l'infection par le mildiou et le sclérotinia. Par ailleurs, la phase de post-infection n'est pas prise en compte pour ces deux maladies.
3. Le degré de résistance génétique est considéré comme identique pour toutes les variétés et pour toutes les maladies.

En réalité, la sévérité d'une maladie dépend aussi du développement du couvert végétal (Mestries *et al.,* 2011). Dans notre cas d'étude, le seul lien entre le pathogène et le développement de la plante sera

représenté par le temps thermique pour indiquer la possibilité d'occurrence des maladies. On se concentrera surtout sur l'impact des conditions climatiques pendant les phases de réceptivité du tournesol.

3. Modélisation

A. *SUNFLO : modèle de culture pour la production du tournesol :*

SUNFLO est un modèle spécifique à la culture du tournesol basé sur les processus et qui simule le rendement en grain et la teneur en huile à pas de temps journalier (Fig. 15). Il a été développé pour simuler et prédire de manière dynamique les réponses d'un couvert végétal de la culture à l'environnement (conditions pédoclimatiques), aux pratiques culturales et à la diversité génétique (Debaeke *et al.*, 2010; Casadebaig *et al.*, 2011; Lecoeur *et al.*, 2011). Aucun impact de stress biotiques (maladies et ravageurs) n'est pris en compte dans le modèle.

Comme la majorité des modèles de culture, il est basé sur le cadre conceptuel de Monteith (1977) considérant le couvert comme un système de capture d'énergie lumineuse via sa surface foliaire. La biomasse journalière est ensuite calculée en fonction du rayonnement incident, de l'efficience d'interception de la lumière et de l'efficience d'utilisation du rayonnement. Les assimilats sont orientés vers les organes de récolte en fin de cycle. Le modèle se base sur une mise en place et une sénescence distribuée de la surface foliaire et non sur une approche « grande feuille » (Desanlis, 2013).

Les effets de stress hydrique et azoté sont pris en compte dans l'expansion foliaire et l'accumulation de biomasse. Les caractéristiques variétales sont renseignées dans un module qui contient douze paramètres dépendants du génotype et mesurables, particularité qui le distingue des autres modèles de culture où ces paramètres sont le plus souvent optimisés. La conduite de la culture est représentée par : la date de semis, la densité de semis, la date et la dose de la fertilisation azotée, la date et la dose d'irrigation et la date de récolte.

Pour la phénologie, le cycle de la culture est divisé en six phases en utilisant le temps thermique (DJ) calculé pour une température de base de 4.8 °C :

- Semis (A0) -levée (A2) ;
- A2-bouton étoilé (E1) ;
- E1-stade F1 (début floraison) ;
- F1-stade M0 (début remplissage des akènes) ;
- M0-stade M3 (maturité physiologique) ;
- M3-stade M4 (récolte).

La profondeur de semis et le taux d'élongation de l'hypocotyle sont également renseignés dans le module de phénologie.

Le sol est décrit en deux couche (0-30 cm, 30 cm - profondeur des racines) par la réserve utile (mm) et la vitesse de minéralisation (kg N/j normalisé). Le climat est représenté à pas de temps journalier par : la température minimale et maximale de l'air (°C), la pluviométrie (mm), l'évapotranspiration potentielle (mm) et le rayonnement global incident (MJ/m^2).

Les principales sorties du modèle sont le rendement en grain et la teneur en huile des grains. Les variables d'état du modèle sont également disponibles en sorties journalières ou sous forme de cumuls.

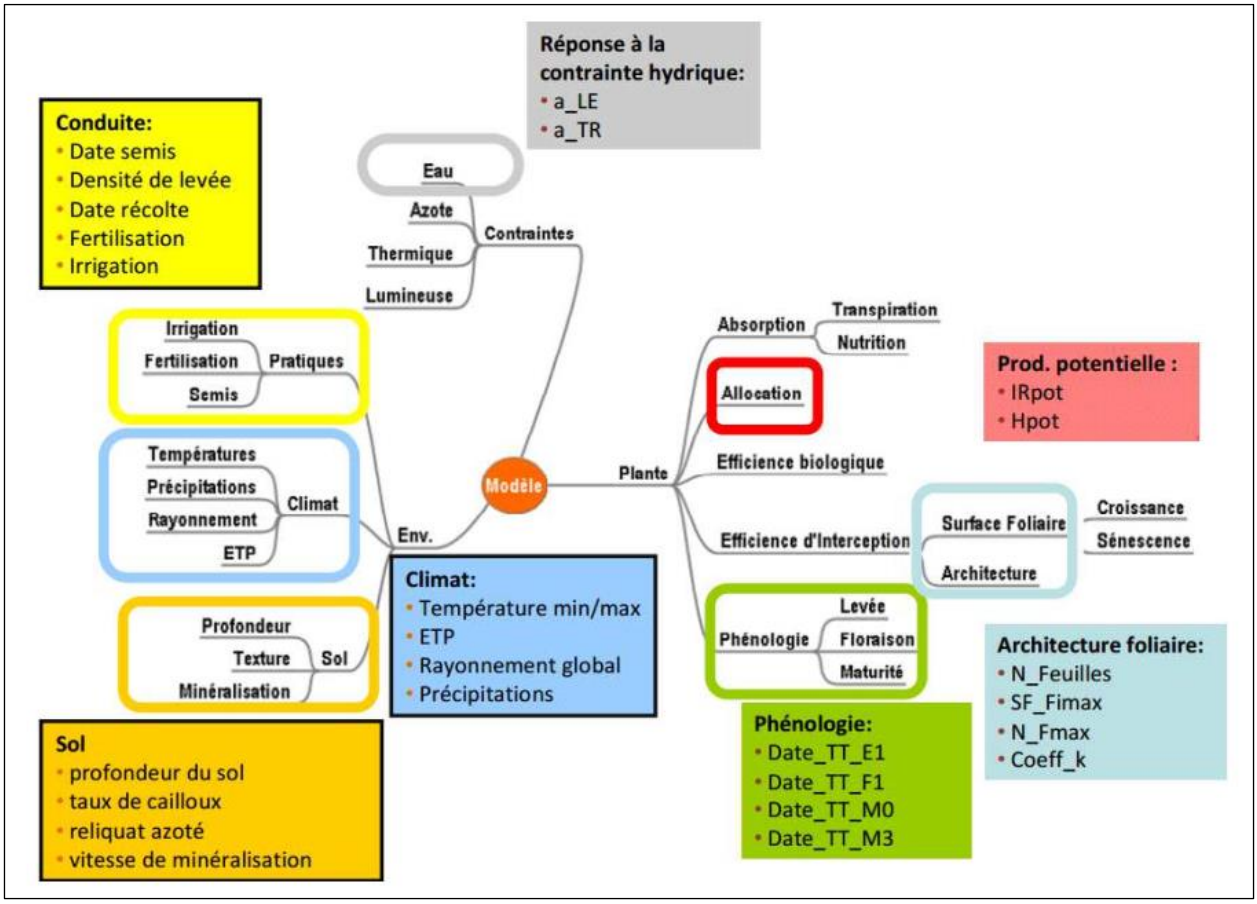

Figure 15. Schéma du modèle SUNFLO. Source : Desanlis (2013)

B. *Modélisation des risques de maladies sur la plateforme X_Pest (ModelBuilder)*

a] Présentation de la plateforme

Nous avons utilisé la plateforme X_Pest pour construire 3 modèles de prédiction des risques phomopsis, mildiou et sclérotinia capitule. C'est une plateforme de modélisation en ligne qui a été développée par INRAE pour aider à concevoir des modèles de prédiction de nuisibilité et pertes de récoltes causées par un ou plusieurs bioagresseurs de culture dans une situation de production donnée. L'avantage de cet outil est de permettre à une large gamme d'utilisateurs de construire leurs modèles par eux-mêmes sans avoir besoin de connaissances préalables en langages de programmation. La plateforme subit des améliorations continues pour offrir plus de possibilités en termes de codage et d'adaptation aux besoins des utilisateurs en conservant son caractère de « facile à utiliser ».

Un projet de modèle sur la plateforme peut être construit en un ou plusieurs modules. Chaque module est constitué de : i) paramètres, paramètres et variables dynamiques et liens qui représentent les inputs, et ii) les expressions de variables qui sont les outputs. Les paramètres sont des valeurs constantes alors que les paramètres et variables dynamiques sont fonction du temps. Ces deux types de données peuvent être renseignés directement sur la plateforme ou importés sous forme de fichiers externes .csv ou .txt. Les liens sont des connexions entre les modules qui permettent de transférer des paramètres et variables. Les expressions de variables sont des équations mathématiques des sorties mobilisant les inputs.

La plateforme comporte deux rubriques principales :

- La forge de modèles : c'est l'espace qui permet de construire un projet de modèle, modifier un projet existant ou même recoder des modèles écrits sous d'autres langages.
- Le centre de simulation : il permet de créer un plan de simulation pour un grand nombre de situations pour le même modèle. Il permet d'importer les fichiers de paramètres et variables

dynamiques correspondant aux situations à simuler. Les simulations peuvent être lancées en une seule fois. Les résultats peuvent être ensuite visualisés sur une interface graphique ou téléchargés dans des fichiers sous format .csv.

b] Le modèle « phomopsis »

Le modèle de prédiction du risque phomopsis (descriptif détaillé du modèle prsénté en annexe 1) a été construit en quatre modules (Fig. 16) :

i. Module de prédiction de maturation des périthèces : il s'agit du modèle SimMat Diaporthe (Aubertot J *et al.*, 2006; Vedy-Zecchini *et al.*, 2018) recodé sur la plateforme avec une actualisation de valeurs des paramètres présentées dans le papier : « SimMat-Diaporthe : a model to predict the dynamics of *Diaporthe helianthi* inoculum production » de Vedy-Zecchini *et al.,* 2020 (accepté pour publication dans European Journal of Plant Pathology). C'est un modèle dynamique mécaniste simple représentant la production d'inoculum primaire de phomopsis avec un pas de temps journalier. Les variables d'entrée sont les précipitations et la température quotidiennes. Les variables de sortie sont la dynamique de maturation des périthèces et le moment de la libération des ascospores pendant le cycle de culture. Les sept paramètres du modèle sont présentés dans le tableau 2. Les valeurs de ces paramètres ont été calibrées sur une base de données de 10 ans à l'aide d'un algorithme original pour identifier la combinaison de paramètres permettant d'atteindre la meilleure qualité prédictive du modèle.

Tableau 2. Paramètres du modèle SimMat Diaporthe

Paramètre	Définition	Valeur	Unité	Symbole X_PEST
θmin	Température minimale journalière de maturation des périthèces	10.3	°C	TN
θmax	Température maximale journalière de maturation des périthèces	30.0	°C	TX
Rmin	Pluviométrie cumulée minimale de maturation des périthèces	4.0	mm	RN
nd	Nombre de jours de pluviométrie cumulée	4	jour	
NFD	Nombre moyen de jours favorables nécessaires à la maturation des périthèces	30	jour	NFD
xσFD	Ecart-type du nombre de jours favorables nécessaires à la maturation des périthèces	15.0	jour	sFD
k	Paramètre décrivant la proportion d'ascospores libérées par les périthèces matures en fonction de la pluviométrie journalière	0.008	mm-1	k

Source : Vedy-Zecchini *et al.,* 2020

La proportion de périthèces matures PMP (d) au jour j est donnée par l'équation 1 :

$$\mathrm{PMP(d)} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma\mathrm{FD}}}\int_0^{CDFM(d)} e^{\frac{-(x-N_{FD})^2}{2\sigma N_{FD}}}dx$$

Où : CDFM (d) est le cumul journalier de jours favorables à la maturation des périthèces.

La maturation des périthèces est possible dès le 1 er février de l'année qui correspond donc au premier jour de simulation sur la plateforme. La valeur initiale de PMP (d) au début de simulation vaut 0.0634219601032 (Vedy-Zecchini *et al.*, 2018).

C'est la proportion de périthèces matures PMP (d) qui nous intéresse dans ce module pour indiquer la possibilité de libération de spores ensuite.

ii. Module de pollution : sous le nom de « modèle_pollution », c'est un modèle qui prédit les jours favorables à un évènement de pollution. On estime que la libération des spores est possible dès que le taux de périthèces matures PMP dépasse 50% (Vedy-Zecchini *et al.*, 2018). Des précipitations de 0.5 mm sont suffisantes pour provoquer des pollutions significatives (Desanlis, 2013). Pour cadrer la phase de sensibilité du tournesol, on a émis l'hypothèse simplificatrice suivante : « seules les projections de spores enregistrées entre les stades E1 et F1 peuvent potentiellement donner des infections dommageables pour la culture ». Les deux stades sont codifiés sous forme de sommes de degrés jours calculés à partir du temps thermique soient : 582 DJ pour E1 et 934 DJ pour F1 (base de paramétrage SUNFLO pour de nombreuses variétés : ici on a choisi une valeur moyenne). Jour après jour, une variable binaire -nommée Pollution- indique :
    - Si l'ensemble desdites conditions annoncées ci-dessus sont vérifiées : le jour considéré est favorable à la pollution.
    - Sinon : le jour est défavorable à la pollution.

    Le somme de jours favorables à la pollution pendant la phase de réceptivité est calculée par la variable « Sum_pollution » au dernier jour de simulation.

iii. Module d'infection : sous le nom de « modèle_infection », c'est un modèle qui prédit les jours favorables à un évènement d'infection. La période de sensibilité est également située entre E1 et F1. Après leur libération, les spores disposent d'une dizaine de jours pour germer (Vedy-Zecchini *et al.*, 2018). Le délai séparant un évènement de pollution d'un évènement d'infection ne peut pas donc dépasser 9 jours. Autrement dit, pour qu'il y ait infection à un jour donné, il faut au moins un évènement de pollution dans les 9 jours précédents. La possibilité d'infection s'étale jusqu'aux 9 jours après F1. Cette plage temporelle est également codifiée en temps thermique.
    Les conditions climatiques favorisant l'infection sont la présence d'eau libre sur la feuille et 36 heures d'hygrométrie supérieure à 90 % (Desanlis, 2013). A dire d'expert, on a traduit ces conditions comme suit : soit une journée avec plus de 10 mm soit 2 jours successifs avec plus 5 mm de pluie chacun.
    Comme pour la pollution, une variable binaire -nommée infection- indique à pas de temps journalier :
    - Si l'ensemble desdites conditions annoncées ci-dessus sont vérifiées : le jour considéré est favorable à l'infection.
    - Sinon : le jour est défavorable à l'infection.

    La somme des jours favorables à l'infection est calculée au dernier jour de simulation par la variable « Sum_infection ». **C'est la variable la plus importante pour nous dans ce module.**

iv. Module de passage feuilles-tige post infection : sous le nom de « modèle_post_infection », c'est un modèle qui prédit les conditions favorables au passage des feuilles vers la tige pendant la phase F1-M3 (M3=1801 DJ après semis). La nuisibilité du phomopsis est surtout liée à la présence de taches encerclantes sur tige.
    Les conditions climatiques favorables à ce passage sont déterminées à dire d'experts comme suivant :
    - Si le nombre de jours avec une température maximale > 32 °C est >= 4 entre F1 et M3 <u>ET</u> le cumul de précipitations < 70 mm entre F1 et M3 alors le risque de passage sur tige est **faible** (conditions bloquantes) ;

- Si le nombre de jours avec une température maximale > 32 °C est >=4 entre F1 et M3 OU le cumul de précipitations < 70 mm entre F1 et M3 alors le risque de passage sur tige est **moyen** (conditions peu favorables) ;
- Si le nombre de jours avec une température maximale > 32 °C est < 4 entre F1 et M3 ET le cumul de précipitations >= 70 mm entre F1 et M3 alors le risque de passage sur tige est **fort** (conditions favorables).

Ces conditions sont exprimées par la variable « appr_risque » qui indique au dernier jour de la simulation 3 possibilités :

- 1 : risque faible
- 2 : risque moyen
- 3 : risque fort

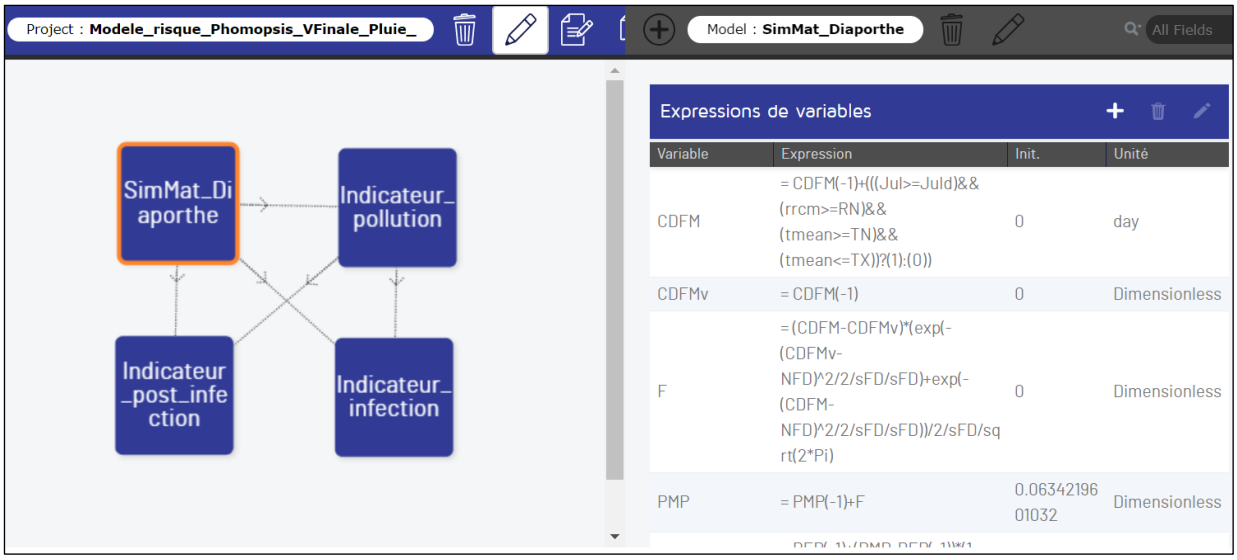

Figure 16. Structure du modèle de prédiction de risque phomopsis sur la plateforme X_Pest

Afin de fournir une appréciation finale de l'incidence de la maladie, on a décidé de ne considérer que le nombre d'évènements d'infection et les conditions de post infection. Les évènements de pollution qui aboutissent à un risque sont pris en compte dans les évènements de pollution. Une règle de décision a été ainsi établie :

- Si le nombre d'évènements d'infection = 0, alors le risque phomopsis est faible ;
- Si le nombre d'évènements d'infection >= 2 et le risque post infection est moyen ou fort, alors le risque phomopsis est fort ;
- Si le nombre d'évènements d'infection >= 2 et le risque post infection est faible, alors le risque phomopsis est moyen ;
- Si le nombre d'évènements d'infection < 2 et le risque post infection est moyen ou fort, alors le risque phomopsis est moyen ;
- Si le nombre d'évènements d'infection < 2 et le risque post infection est faible, alors le risque phomopsis est faible.

c] Le modèle « mildiou »

Il s'agit d'un modèle qui simule le risque d'**infection** par le mildiou. La phase de sensibilité est bornée par les 5 jours avant semis et après semis. Si on admet que l'inoculum primaire n'est pas limitant, les conditions favorables à une infection sont rapportées dans la bibliographie : une température comprise entre 6 et 32 °C avec un optimum de 18 à 24 °C et une température du sol supérieure à 10 °C. De plus, les conditions

humides telles que la présence de l'eau libre sur feuilles et une humidité relative supérieure à 70% sont nécessaires. Pour faire simple, nous avons formulé ces conditions comme suit :

- Si la température maximale de l'air >= 10 °C et le cumul de précipitations pendant les dix jours encadrant le semis >= 50 mm, alors le risque d'infection par le mildiou est **fort** ;
- Si la température maximale de l'air >= 10 °C et le cumul de précipitations pendant les dix jours encadrant le semis est compris entre 30 et 50 mm, alors le risque d'infection par le mildiou est **moyen** ;
- Si la température maximale de l'air < 10 ° C OU le cumul de précipitations pendant les dix jours encadrants <30, alors le risque d'infection par le mildiou est **faible**.

L'appréciation du risque d'infection est calculée par la variable « apprec_risque » qui indique au dernier jour de simulation :

- 1 : risque faible
- 2 : risque moyen
- 3 : risque fort

d] Le modèle « sclérotinia du capitule »

Il s'agit d'un modèle qui simule le risque d'**infection** par le sclérotinia capitule. Il est rapporté qu'une infection directe par les apothécies est possible après une période de présence d'eau libre sur les feuilles, suivie de 16 heures d'humidité relative supérieure à 90% sous un optimum de 21 °C à 26 °C.

Nous avons défini la période de sensibilité du tournesol dans la plage temporelle entre F1 et F1+200 DJ. Les conditions dites d'infection à dire d'experts qu'on a mis dans notre modèle sont décrites comme suit :

- Si la température moyenne de l'air >= 25 °C et précipitations journalière >= 20 mm pendant 3 jours successifs, alors le risque d'infection est **fort** ;
- Si la température moyenne de l'air >= 25 °C pendant 3 jours successifs et précipitations journalières >= 20 mm pendant 2 jours successifs, alors le risque d'infection est **moyen** ;
- Si la température moyenne de l'air < 25 °C OU précipitations journalières < 20 mm, alors le risque d'infection est **nul**.

Ces conditions sont codifiées par la variable « apr_risk_sclero », qui simule le risque d'infection à pas de temps journalier entre F1 et F1+200 DJ et retourne :

- 2 : risque fort
- 1 : risque moyen
- 0 : pas de risque

Le nombre de jours à risque fort et à risque moyen sont calculés au dernier jour de simulation par les deux variables « cumul_hr » et « cumul_mr » ; respectivement.

4. Simulation

A. *Simulation de la production du tournesol avec SUNFLO*

Les simulations avec le modèle SUNFLO ont été réalisées par Mathilde Arrouze durant son stage à l'UMR AGIR en 2019. Pour ce faire, elle a choisi les données suivantes :

- **Le climat :** les variables climatiques proviennent de la base de données du projet CLIMATOR (2007-2010). Il s'agit d'un projet de recherche qui a mobilisé dix-sept équipes de sept instituts et organismes, associant ainsi des disciplines variées. Le projet avait pour but de fournir des méthodes et des résultats concernant l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés variés en France. Les données climatiques générées dans le cadre de ce projet sont des prévisions futures simulées à l'aide de différents modèles climatiques en fonction de plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP (Representative Concentration Pathway) : RCP 2.6 ; RCP 4.5 ; RCP 6.0 et RCP 8.5 classés du

plus optimiste au plus pessimiste ; respectivement. Ces données sont disponibles pour douze sites en France métropolitaine et un autre site en Guadeloupe (Brisson et Levrault, 2010).

Les données utilisées dans nos simulations correspondent au scénario RCP 8.5. Il s'agit de données journalières de 2000 à 2100. Pour cette étude, et pour des raisons de restriction de la durée de stage, nous avons décidé de retenir cinq sites uniquement : Toulouse, Avignon, Dijon, Lusignan et Mons. Le choix de ces sites repose sur le fait qu'ils couvrent de manière représentative différents contextes climatiques et de production de la culture dans cinq régions de l'hexagone (Fig. 17).

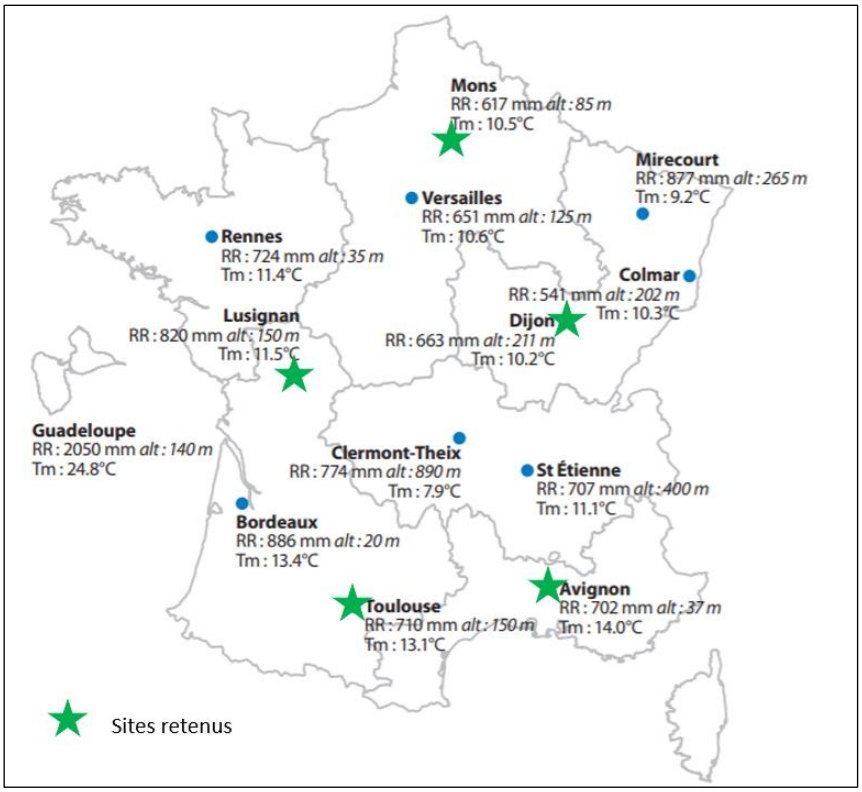

Figure 17. Localisation des sites retenus pour les simulations. Modifié d'après Brisson et Levrault, 2010.

- **Le sol :** deux types de sol ont été définis : un sol profond de 1,30 m et un sol superficiel de 65 cm. Ces deux sols diffèrent uniquement par leur profondeur et donc par le volume de réserve utile accessible aux racines. On a considéré que ces 2 types sont présents dans chaque région.

- **Les variétés :** à partir d'une base de données SUNFLO décrivant les paramètres variétaux de 217 variétés, un calcul a été fait pour obtenir une variété « moyenne » pour chacune des classes de précocité : très précoce (TP), précoce (P) ou mi-tardive (MT).

B. *Simulation du risque maladies avec la plateforme X_Pest :*

Afin de diagnostiquer le risque et l'évolution future des trois maladies en parallèle avec la production du tournesol, on a utilisé les mêmes données climatiques que pour les simulations SUNFLO sur les cinq sites retenus. Les simulations sont réalisées pour chaque année et initiées au premier jour julien de l'année soit le 1 er janvier. Cependant le calcul du temps thermique pour repérer les stades du développement de la culture commence le jour de semis. Ce dernier est indiqué par une variable dans chacun des modèles. Pour un site donné, la seule variable qui fait la différence entre nos ITK est la **date de semis**. Le temps thermique des stades ne diffère pas selon les classes de précocité car on a utilisé des valeurs moyennes de DJ des stades de sensibilité pour toute classe de précocité confondue.

Pour les irrigations que ce soient systématiques à la levée (en dérobé) aux d'appoint autour de la floraison pour les ITK d'adaptation, on a décidé de ne pas les ajouter aux précipitations dans la prédiction du risque maladies car elles biaisent les résultats. On a estimé que, par logique et bon sens, un agriculteur n'irrigue pas en réalité pour faire lever s'il pleut. Ou s'il irrigue, il le fait de telle façon à ne pas créer des conditions favorables au développement de maladies cryptogamiques.

a] Evaluation de la qualité prédictive des modèles

Du fait d'un manque de données régionales pour la validation, seul le modèle phomopsis a été testé pour sa qualité de prédiction. Nous avons utilisé les données des bulletins de santé végétale (BSV) de la région Midi-Pyrénées entre 1985 et 2020 à l'exception de l'année 2008 pour laquelle nous n'avons pas trouvé d'information, ce qui fait un total de 34 ans. Ces BSV indiquent le risque observé sur un réseau de parcelles surveillées et on les a comparés aux prévisions de notre modèle sur les données climatiques réelles provenant de la seule station météorologique de INRAE à Auzeville-Tolosane.

b] 4.2.2. Traitement de données et analyse de résultats

Le nombre de simulations pour SUNFLO est égal au nombre de sites × nombre d'ITK × nombre types du sol × nombre d'années. Dans notre étude :

[(3 sites nord × 3 ITK) + (2 sites sud × 4 ITK)] × 2 types de sols × 101 années = 3434 simulations.

Le nombre de simulations pour X_Pest est égal au nombre de sites × nombre d'ITK × nombre d'années = 1717 simulations pour chacune des maladies.

Les séries temporelles de données climatiques ont été divisées en trois périodes afin de faciliter le traitement des résultats de simulation :

- **Présent** : de 2000 à 2020, elle sert comme référence pour comparer les résultats au-delà de 2020.
- **Futur proche (F.P)** : de 2021 à 2050.
- **Futur lointain (F.L)** : de 2071 à 2100.

Cette division est recommandée par le projet CLIMATOR (Brisson et Levrault, 2010) et dans le rapport de (Ouzeau *et al.*, 2014) pour explorer l'impact du climat futur en agriculture.

Ceci fait 102 situations (site × ITK × type du sol × période) SUNFLO à analyser et 51 situations X_Pest par maladie.

Les résultats de simulations ont été traités à l'aide d'Excel et Statistica 8.0. Les cartes de risques maladies ont été établies avec le logiciel QGIS.

5. L'évaluation multicritère :

Afin d'évaluer la performance des ITK d'adaptations, un modèle d'évaluation multicritère a été implémenté dans le logiciel DEXi. La figure 18 illustre l'arborescence du modèle décisionnel et les pondérations associées. La performance d'un ITK se résume en trois piliers : production, risque sanitaire et impact sur l'environnement. Chacun des piliers est renseigné via différents critères de base, éventuellement agrégés en critères intermédiaires. Chaque critère de base est renseigné à l'aide d'un indicateur quantitatif ou qualitatif. Le nombre d'indicateurs dont nous disposions était limité. On a choisi les critères les plus pertinents pour chacun des piliers de façon qu'il n'y ait pas redondance.

- Pour production : on a souhaité de rendre compte les préoccupations de l'agriculteur mais aussi de la filière. Donc on a pris la rentabilité pour juger de la performance pour l'agriculteur, assurer un revenu et une pérennité de son exploitation. Le rendement est un enjeu pour l'agriculteur qui lui garantit une bonne rentabilité mais aussi pour la filière, afin de préserver un certain niveau de collecte, avec une bonne qualité technologique de la production représentée principalement par la teneur en huile des graines.

- Pour les maladies : on a choisi les trois maladies principales pour lesquelles on a construit des modèles pour évaluer l'évolution de leurs risques.
- Pour l'impact sur l'environnement : il est représenté par la pression sur les ressources en eau et en énergie et la dépendance aux intrants chimiques (azote et produits phytopharmaceutiques fongicides).

Les pondérations :

La production est considérée comme le pilier le plus important car elle est la première fonction de pratiquer l'agriculture, et garantir une viabilité des exploitations et de la filière. C'est dans la même optique qu'on a décidé de donner plus de poids à la rentabilité par rapport au rendement et richesse en huile. Pour les maladies, on a estimé que les attaques du mildiou sont les plus nuisibles car le développement des plantes est arrêté très tôt ce qui se répercute directement sur la perte du rendement. Les attaques de phomopsis et sclérotinia capitule surviennent dans des stades plus tardifs et ont la possibilité d'être récompensées. Pour l'impact sur l'environnement, la pression sur les ressources a plus de poids car dans un cadre de changement climatique, l'eau est une ressource qui devient de plus en plus rare et la tendance est de réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de la consommation d'énergie en agriculture.

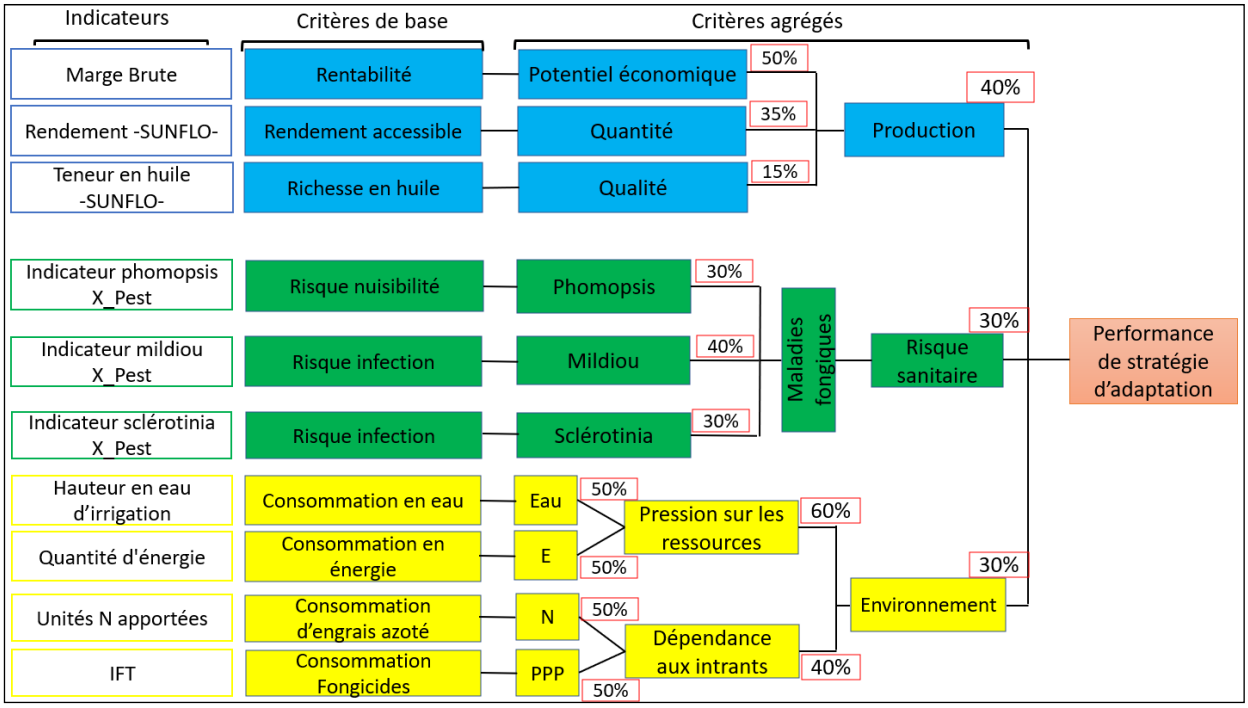

Figure 18. Arborescence du modèle de l'évaluation multicritère avec les pondérations associées

Les indicateurs sont définis comme suit :

- **Marge brute (€/ha)** : c'est la différence entre le produit brut et les charges opérationnelles, rapportée à l'hectare. Le calcul du produit tient compte de la teneur en huile des graines, et subit en fonction de sa valeur une pénalisation ou bonification sur le prix de vente : il augmente (et diminue, respectivement) de 1,5% du prix de vente de base par point d'huile au-dessus (et en dessous, respectivement) de la norme de teneur en huile commerciale de 44% (graines à 9% de teneur en eau et 2% d'impuretés). Les charges opérationnelles concernent les coûts de : semences, produits phytosanitaires, engrais et irrigation. Le produit brut égale donc à :

$$P = (Pb*[1+0.015*(OC-44)]*Rdt)$$

Avec : P = produit brut (€/ha)
Pb = prix de vente de base (€/t)
OC = la teneur en huile des graines (%)
Rdt = rendement à l'hectare (t/ha)

$$\text{Marge brute} = \text{Produit brut} - \text{Charges opérationnelles}$$

Cet indicateur fournit une évaluation de potentiel économique de chacun des ITK

- **Rendement (q/ha)** : il s'agit de la variable sortie de SUNFLO « GY ». On a utilisé cet indicateur pour renseigner ce qu'on a appelé rendement en grains accessible en tenant compte des stress hydrique et azoté et qui chiffre la production en termes de quantité. SUNFLO calcule le rendement à 0 % d'humidité des graines, on a dû convertir en rendement aux normes commerciales (11 % d'humidité) en utilisant la formule suivante :

$$\text{GY aux normes} = \text{OC à } 0\% / 0.89$$

- **Teneur en huile (%)** : correspond à la variable sortie SUNFLO « OC ». C'est le seul indicateur dont on disposait pour renseigner la qualité de la production. SUNFLO calcule la teneur en huile des graines à 0% d'humidité alors qu'elles contiennent normalement à la récolte 9% d'humidité et 2% d'impuretés. On a utilisé la formule suivante :

$$\text{OC aux normes} = 0.89 * \text{OC à } 0\%$$

- **Indicateur phomopsis X_Pest** : il s'agit de l'indicateur d'appréciation finale de nuisibilité de la maladie calculé en fonction du nombre d'évènements d'infection et du risque post-infection.
- **Indicateur mildiou X_Pest** : C'est l'indicateur d'appréciation du risque d'infection calculé sur la base du nombre d'évènements d'infection qui ont eu lieu pendant la phase de sensibilité.
- **Indicateur sclérotinia X_Pest** : correspond à la variable « apr_risk_sclero » qui indique le niveau du risque d'infection pendant la période de sensibilité.
- **Volume en eau d'irrigation (mm)** : correspond à la somme des quantités d'eau apportées pour chaque ITK. Il ne renseigne sur le degré de la pression sur la ressource « eau ».
- **Quantité d'énergie (GJ/ha)** : fonction surtout du nombre de passages pour traitement fongicide, de la quantité d'engrais apportée et d'irrigation, il indique le niveau de pression sur des énergies non renouvelables.
- **Quantité d'azote apportée (u)** : elle correspond aux nombres d'unités d'azote apportées par fertilisation selon l'ITK. Elle indique une certaine dépendance par rapport aux intrants chimiques.
- **IFT Fongicide** : il est fonction de l'application de produits fongicides selon selon le niveau de risque infection phomopsis. Pour décider s'il faut faire un traitement contre le phomopsis ou pas, on tient compte du nombre d'événements d'infection et de la valeur de l'indice foliaire (LAI) au moment de la floraison générée par SUNFLO. On considère l'application d'un traitement à dose pleine (IFT = 1) nécessaire si : nombre d'événements d'infection > 2 et LAI > 3.5 ; sinon, aucun traitement ne sera appliqué.

Il faut noter que l'évaluation multicritère est faite par situation (site × ITK × type du sol × période). Pour renseigner chaque critère de base, la valeur de l'indicateur utilisé est obtenue par périodes en faisant la moyenne de l'indicateur sur le nombre des années.

Le seuillage pour le passage des indicateurs quantitatifs aux indicateurs qualitatifs ainsi que le nombre de classes par chaque indicateur sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3. Valeurs seuils retenus des indicateurs et méthode de détermination

Critère de base	Indicateur	Seuils Retenus	Méthode de détermination et justification
Rentabilité	Marge brute	< 600 € **faible** ; 600-1000 € **moyenne** ; > 1000 € **forte**.	Les valeurs de marge brute semblent surestimées principalement à cause des rendements élevés. Les seuils proposés par les références extérieures ne se justifient pas. Nous avons opté pour le choix de ces seuils après un test statistique de distribution de nos valeurs.
Rendement accessible	Variable rendement SUNFLO	< 22 q/ha faible ; 22-35 q/ha **moyen** ; > 35 q/ha **fort**.	22 q/ha étant la moyenne nationale en 2019, nous avons constaté que les rendements simulés avec SUNFLO sont relativement élevés (surestimées). Ces seuils sont établis sur la base d'un test statistique de distribution de valeurs dans notre échantillon.
Richesse en huile	Teneur en huile SUNFLO	< 44 % **mauvaise**, > 44 % **bonne**.	44 % est la norme de commercialisation pour la teneur en huile des graines.
Risque nuisibilité phomopsis	Indicateur phomopsis X_Pest	> 7 années/ 10 à risque faible : **faible** ; > 3 années/ 10 à risque fort : **fort** ; Si non : **moyen.**	A dire d'experts
Risque d'infection mildiou	Indicateur mildiou X_Pest	> 7 années/ 10 à risque faible : **faible** ; > 3 années/ 10 à risque fort : **fort** ; Si non : **moyen.**	A dire d'experts
Risque d'infection sclérotinia	Indicateur sclérotinia X_Pest	Au moins 1 année /10 à risque fort <u>ET</u> > 5 année /10 à risque moyen : **fort** ; Au moins 1 année /10 à risque fort <u>OU</u> > 5 année /10 à risque moyen : **moyen,** si non : **faible**	A dire d'experts
Consommation en eau d'irrigation	Hauteur d'eau apportée	Pas d'irrigation : faible ; = 20 mm moyenne ; = 70 mm <u>OU</u> 90 mm **forte**.	Pour discriminer les trois niveaux des ITK
Consommation en énergie	Quantité d'énergie	=< 13 GJ/ha modérée ; > 13 GJ/ha élevée.	Moyenne de consommation d'énergie en grande culture en Midi-Pyrénées (source : SOLAGRO, 2008-2009)

Consommation d'engrais azoté	Unité d'azote apporté	= 30 u modérée ; =60 u élevée.	Pour discriminer les deux niveaux des ITK
Consommation fongicides	IFT	0 IFT : **Pas de traitement**, >= 1 IFT : traitement	Il existe des situations où aucun traitement n'est appliqué et des situations avec des traitements mais qui sont relativement modérés.

Partie 4
Résultats

1. Aperçu sur le climat futur

Afin de caractériser les prévisions du changement climatique sur les sites retenus dans cette étude, et pour mieux cadrer la coïncidence entre ce changement et le cycle du tournesol, nous avons comparé les données climatiques de température et de précipitations utilisées pour les simulations avec des données de référence. La période de référence correspond à un passé récent entre 1971 et 1999. Les données de cette période sont également issues du projet CLIMATOR et représentent des simulations par des modèles climatologiques et agronomiques, calibrés et validés sur des données réelles. Les résultats présentés ci-après récapitulent les écarts entre les périodes Présent (2000-2020), Futur proche (F.P, 2021-2050) et Futur lointain (F.L, 2071-2100) par rapport à la référence de passé récent de chaque site :

A. *La pluviométrie*

La figure 19 montre les écarts des cumuls moyens de pluviométrie pour le présent, le F.P et le F.L calculés entre les mois de mars et octobre (intervalle pendant lequel la culture de tournesol est en place) par rapport à la moyenne correspondante du passé récent.

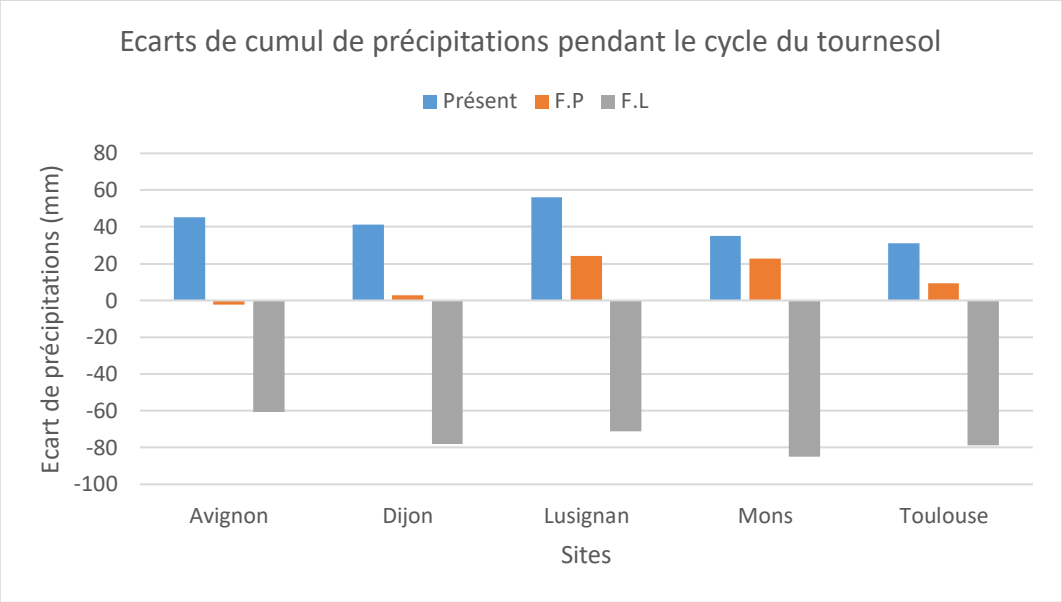

Figure 19. Ecarts des cumuls moyens de précipitations pour les périodes Présent, F.P et F.L par rapport à la référence pendant le cycle du tournesol.

D'après la figure 19, tous les sites reçoivent des cumuls de pluie supérieurs à la moyenne pour le Présent et le F.P (à l'exception d'Avignon_F.P). Ces écarts positifs varient entre 31 et 56 mm pour le Présent sur Toulouse et Lusignan respectivement, et entre 3 et 24 mm pour le F.P sur Dijon et Mons respectivement. En revanche, la période F.L est caractérisée par des cumuls nettement en-dessous des moyennes de référence. On constate ainsi des baisses considérables qui peuvent atteindre -85 mm à Mons.

En termes de variabilité intra-annuelle, les augmentations de précipitations pour le Présent et F.P semblent peu profitables pour la culture du tournesol. La figure 20 illustre les écarts mensuels pour le Présent, F.P et F.L à Avignon et à Toulouse. Les augmentations surviennent dans des phases précoces ou tardives ou pendant des périodes de l'année pendant lesquelles le tournesol n'est pas cultivé. Les mois de juin et juillet qui coïncident souvent avec une phase sensible de la culture qui est la floraison sont plutôt caractérisés par des baisses de pluviométrie pour Présent et F.P. Ces deux mois subissent des diminutions encore plus importantes pour F.L.

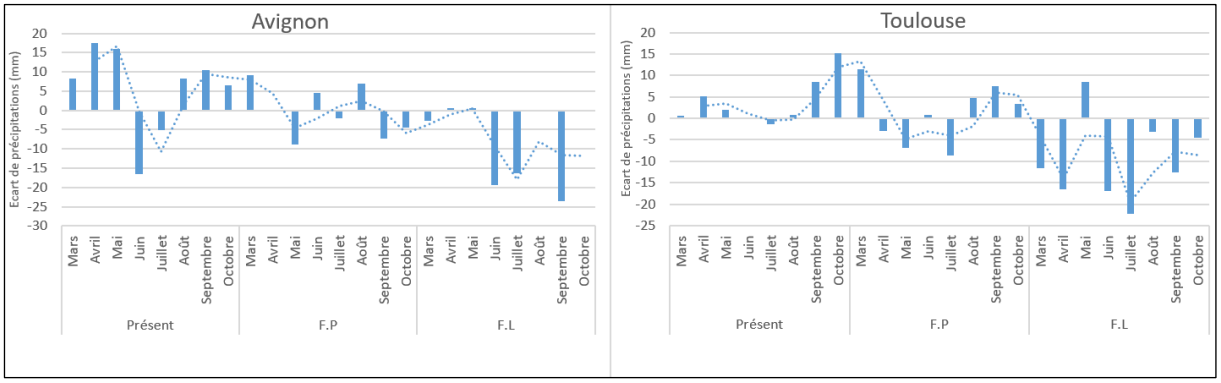

Figure 20. Ecarts mensuels des cumuls moyens de précipitations pour les périodes Présent, F.P et F.L par rapport à la référence pendant le cycle du tournesol sur les sites du sud de la France.

Les mêmes tendances sont observées sur les sites du nord avec une exception pour le mois de juin pour F.P à Lusignan et Mons (Fig. 21). La période F.L reste marquée par des baisses de pluviométrie qui surviennent vers la fin du cycle de la culture.

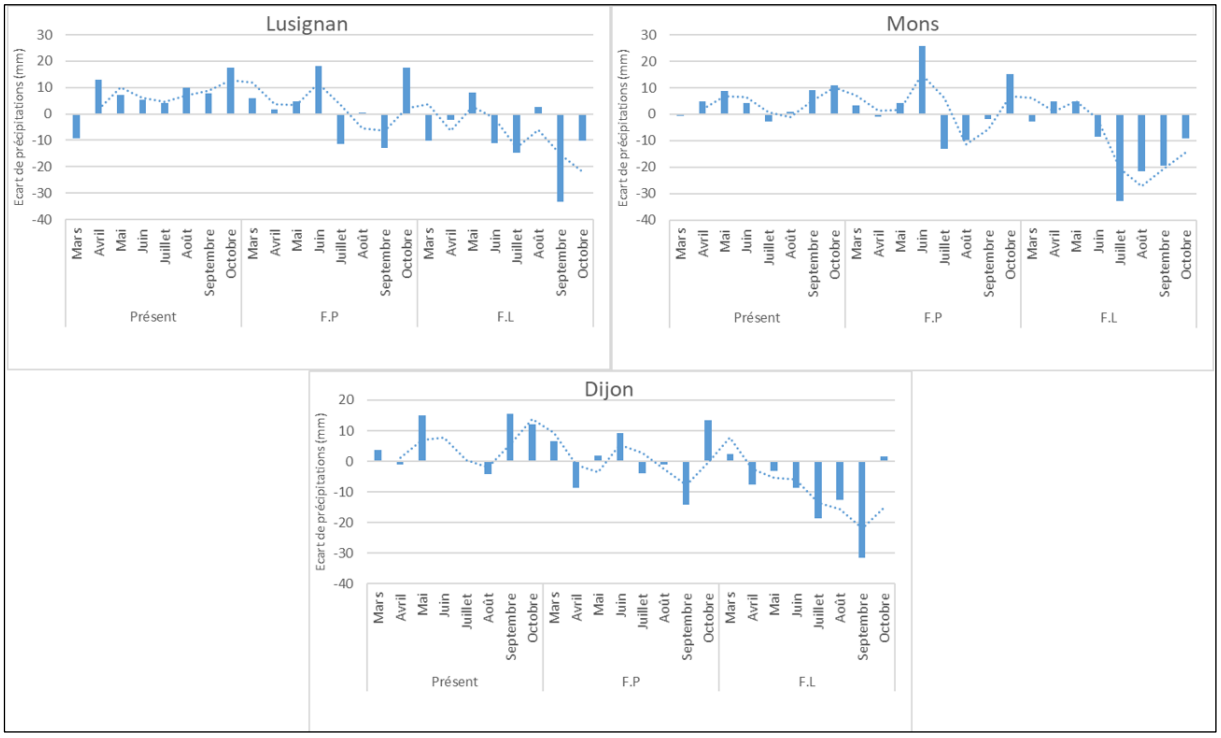

Figure 21. Ecarts mensuels des cumuls moyens de précipitations pour les périodes Présent, F.P et F.L par rapport à la référence pendant le cycle du tournesol sur les sites du Centre et du Nord de la France.

B. *La température*

Les écarts de température moyenne par période sont présentés dans la figure 22. On remarque des augmentations sur toutes les périodes et pour tous les sites. Le rythme d'augmentation est exponentiel : plus on avance dans le futur, plus l'augmentation est importante. Les températures semblent évoluer de la même façon sur tous les sites. On passe des écarts compris +0.5 et +1 °C pour le Présent à des écarts entre +4 et +5 °C pour F.L.

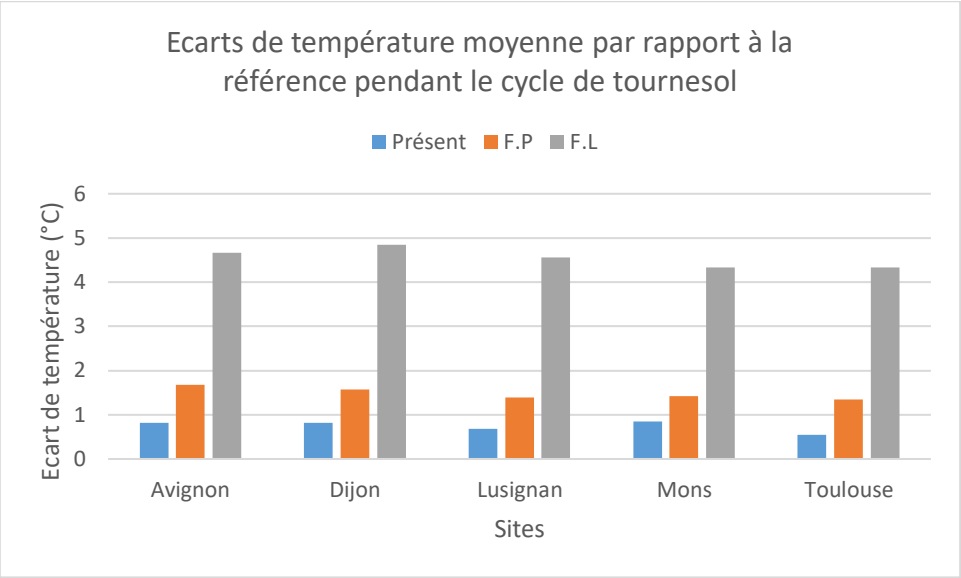

Figure 22. Ecart de température moyenne pour les périodes Présent, F.P et F.L par rapport à la référence pendant le cycle de tournesol.

Les variations mensuelles montrent quant à elles des tendances similaires. On s'attend à des augmentations sur toute la période de culture du tournesol. A titre d'exemple, l'écart par rapport à la référence peut atteindre +4.5 °C pendant le mois de juin et + 6 °C pendant le mois de juillet pour la période F.L à Avignon et à Mons (Fig. 23).

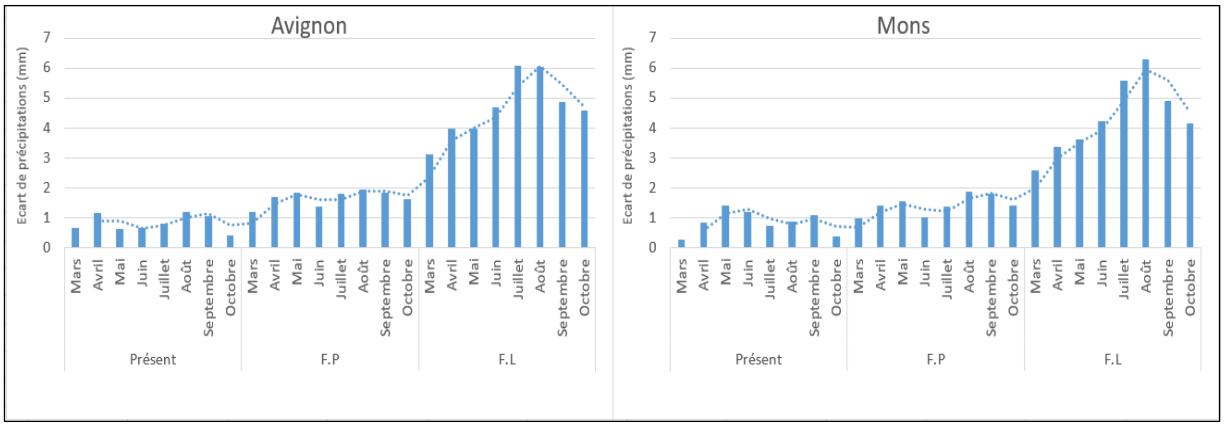

Figure 23 Variations mensuelles de température moyenne par rapport à la référence pendant le cycle du tournesol pour les périodes Présent, F.P et F.L à Avignon et à Mons.

2. Simulations avec SUNFLO

Afin de montrer les effets prévus du changement climatique et des stratégies d'adaptation choisies sur la culture de tournesol, nous présentons dans cette partie les résultats de quelques sites pour les deux sorties principales du modèle SUNFLO : le rendement en grain et la teneur en huile. Les résultats sont présentés par moyenne sur les périodes et pour les deux types de sols. Faute de manque de temps, nous avons choisi les deux sites du sud avec un site nord (Mons) car ça nous a semblé le plus pertinent pour illustrer les tendances. En fait, les tendances sont très proches entre les sites d'une même région, notamment ceux du nord.

Toulouse

- Sol profond

La figure 24 montre que les rendements des itinéraires techniques (ITK) « référence », « irrigation » et « esquive » sont semblables au sein des périodes. Le rendement de la culture dérobée est significativement inférieur aux autres. Ainsi, le rendement de chaque ITK ne montre pas de variations significatives entre les périodes sauf pour la culture dérobée qui voit son rendement diminuer significativement en F.L par rapport aux périodes précédentes. Les valeurs de rendement avoisinent 38 q/ha pour les ITK de référence, irrigation et esquive sur les trois périodes. Les rendements de la culture dérobée passent d'environ 24 q/ha pour Présent et F.P à 18 q/ha en F.L. On remarque également que la variation interannuelle est plus importante pour F.L et notamment pour la culture dérobée.

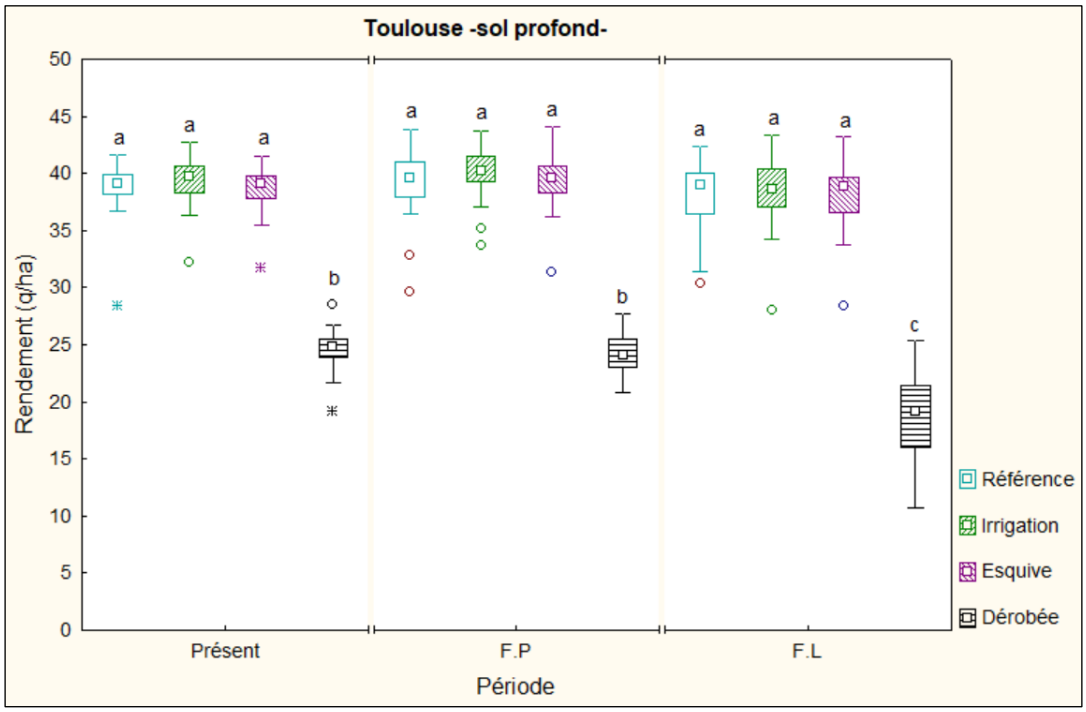

Figure 24. Variations des rendements pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% (α = 0.05) d'après le test de Tukey. Site de Toulouse pour un sol profond

La teneur en huile quant à elle, ne montre aucun effet significatif des ITK pour les périodes Présent et F.P mais elle diminue significativement et de la même façon au F.L quel que soit l'ITK : elle est au-dessus de 44% en présent et FP mais passe majoritairement en deçà en FL. Cependant, elle semble plus stable entre années en culture dérobée notamment au F.P par rapport aux autres ITK mais elle devient la plus variable au F.L (Fig. 25).

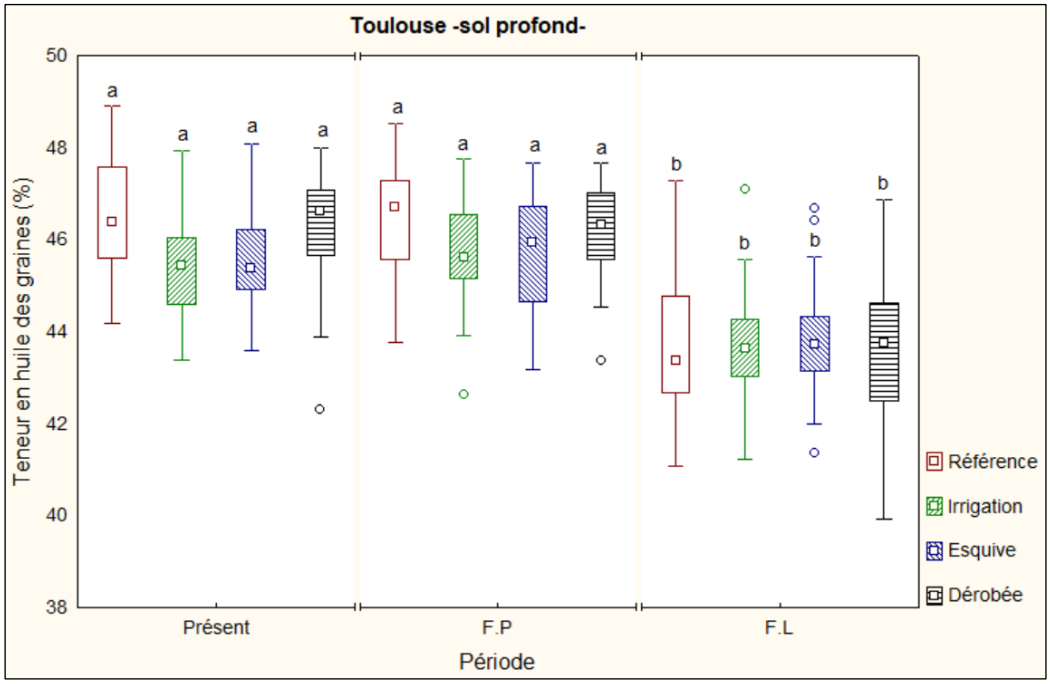

Figure 25. Variations de la teneur en huile pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% (α = 0.05) d'après le test de Tukey. Site de Toulouse pour un sol profond

- Sol superficiel

Le rendement varie significativement entre les ITK au sein des périodes. L'ITK « irrigation » donne un rendement nettement supérieur aux autres ITK. Les variations interannuelles sont plus importantes en F.L. Ainsi, la culture dérobée subit les pertes de rendement les plus importantes en F.L (Fig. 26).

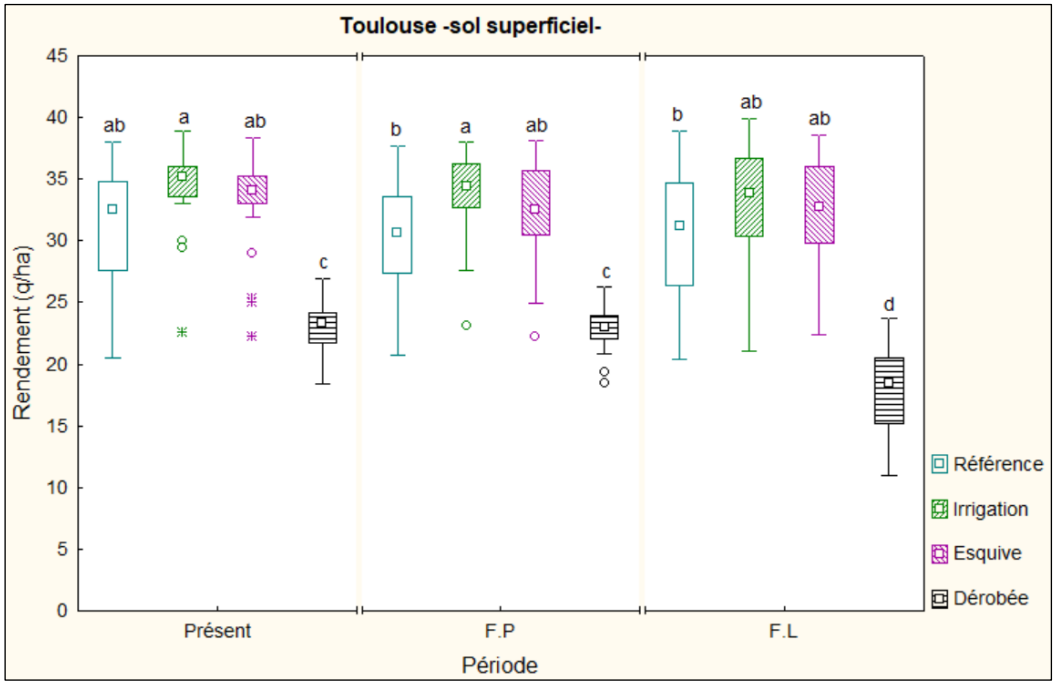

Figure 26. Variations des rendements pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% (α = 0.05) d'après le test de Tukey. Site de Toulouse pour un sol superficiel.

Pour la teneur en huile, on remarque très peu d'effet de l'ITK. Elle diminue significativement en F.L et devient plus variable pour tous les ITK. La moyenne de l'ITK d'esquive est inférieure aux autres pour le Présent. Pour F.P et F.L, c'est la teneur en huile obtenue en culture dérobée qui chute significativement. On remarque aussi que les valeurs moyennes passent au deçà de 44% au F.L pour tous les ITK (Fig.27).

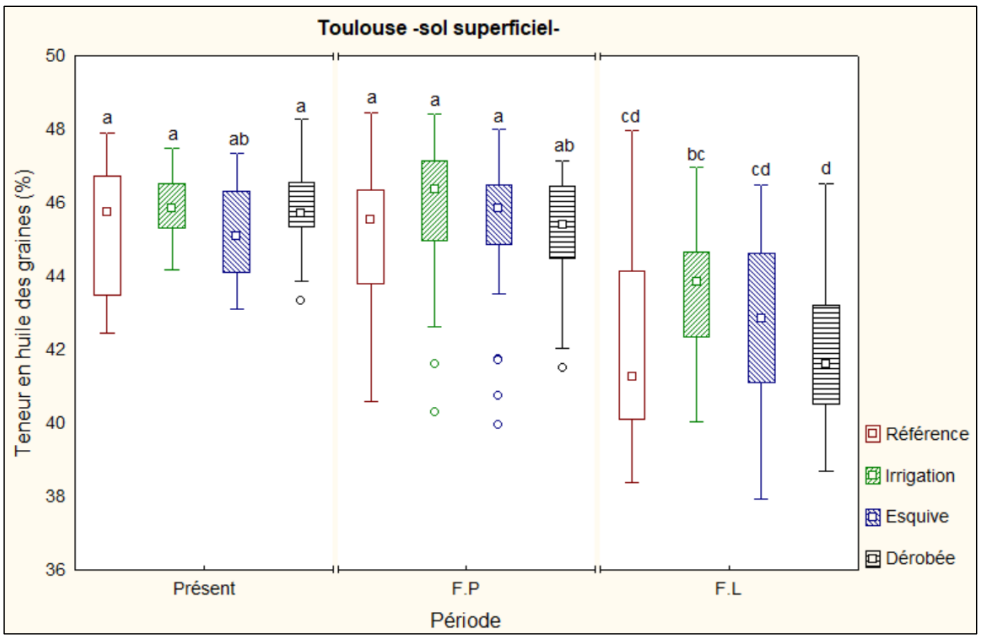

Figure 27. Variations de la teneur en huile au présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% (α = 0.05) d'après le test de Tukey. Site de Toulouse pour un sol superficiel.

Avignon

Les résultats des deux variables agronomiques et pour les deux types du sol sont présentés dans le tableau 4.

Sur un sol profond, que ce soit pour le rendement ou la teneur en huile les ITK de référence, irrigation et esquive ont des moyennes statistiquement similaires alors que celle de la culture dérobée leur est inférieure. En F.L, on assiste surtout à une diminution de la teneur en huile pour tous les ITK par rapport au Présent et F.L.

Sur un sol superficiel, la tendance est la même pour le rendement. En ce qui concerne la teneur en huile, elle est différente en fonction de l'ITK. Les meilleures valeurs sont obtenues avec l'ITK d'irrigation sur les trois périodes. Elle diminue significativement pour l'ITK de référence en F.P par rapport au Présent (43,9 % contre 44,7 %, respectivement), et diminue pour F.L par rapport au Présent et à F.P quel que soit l'ITK.

Tableau 4. Variations des rendements pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les valeurs représentent les moyennes ± les ES. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% (α = 0.05) d'après le test de Tukey. Site d'Avignon.

		Avignon -sol profond-		**Avignon -sol superficiel-**	
Période	ITK	Rendement (q/ha)	Teneur en huile (%)	Rendement (q/ha)	Teneur en huile (%)
Présent	Référence	37,14±0,86^{a}	47,05±0,2^{a}	27,17±1,2^{a}	44,73±0,44^{abc}
	Irrigation	38,41±0,65^{a}	46,69±0,16^{ab}	30,43±1,06^{a}	45,33±0,34^{ab}
	Esquive	38,73±0,65^{a}	46,44±0,14^{ab}	29,74±1,11^{a}	44,44±0,34^{abc}
	Dérobée	23,44±0,56^{d}	46,56±0,22^{ab}	21,3±0,59^{d}	44,3±0,31a^{bcd}
F.P	Référence	37,25±0,78^{a}	46,36±0,16^{ab}	29±1,08^{a}	43,88±0,37^{bcd}
	Irrigation	37,19±0,73^{a}	46,33±0,16^{ab}	30,22±1,01^{a}	45,54±0,28^{a}
	Esquive	37,73±0,72^{a}	46,05±0,17^{ab}	30,41±0,98^{a}	44,55±0,39^{abc}
	Dérobée	23,06±0,34^{d}	45,9±0,16^{b}	21,43±0,34^{d}	43,79±0,29^{bcd}
F.L	Référence	35,25±0,78^{a}	44,03±0,24^{c}	27,25±1,11^{a}	41,9±0,41^{e}
	Irrigation	35,5±0,82^{a}	44,49±0,24^{c}	27,51±1,22^{a}	43,24±0,41^{cde}
	Esquive	36,01±0,79^{a}	44,31±0,24^{c}	28,99±1,18^{a}	42,5±0,45^{de}
	Dérobée	13,95±0,67^{c}	41,46±0,31^{d}	13,81±0,58^{c}	40,2±0,29^{f}

Dijon

Sur un sol profond, le rendement ne varie pas en F.P par rapport au présent pour l'ITK de référence et la culture en dérobée tandis qu'il diminue pour la stratégie d'esquive. En F.L, il connait des baisses significatives pour tous les ITK par rapport aux valeurs Présent et F.P. D'autre part, la teneur en huile est marquée par des augmentations significatives en F.P pour la stratégie d'esquive et la culture dérobée comparativement à Présent alors qu'elle reste invariable pour l'ITK de référence. En F.L, la teneur en huile baisse significativement par rapport aux deux autres périodes et pour tout ITK confondu (tableau 5).

Sur un sol superficiel, le rendement des ITK de référence et d'esquive est similaire et reste invariable au fil du temps, alors que celui de la culture dérobée diminue significativement en F.L par rapport à Présent et F.P. La teneur en huile de l'ITK de référence est supérieure aux adaptations quelle que soit la période. On remarque également des baisses significatives en F.L par rapport aux deux autres périodes pour l'ensemble des ITK (tableau 5).

Tableau 5. Variations des rendements pour les périodes Présent, F.P et F.L en fonction des ITK. Les valeurs représentent les moyennes ± les ES. Les lettres indiquent les différents groupes homogènes des moyennes à un seuil de signification de 5% (α = 0.05) d'après le test de Tukey. Site de Dijon.

		Dijon -sol profond-		Dijon -sol superficiel-	
Période	ITK	Rendement (q/ha)	Teneur en huile (%)	Rendement (q/ha)	Teneur en huile (%)
Présent	Référence	40,93±0,43^{a}	47,4±0,25^{a}	34,46±0,66^{a}	46,93±0,33^{a}
	Esquive	40,17±0,44^{a}	46,3±0,24^{abc}	33,45±0,65^{a}	46,01±0,29^{ab}
	Dérobée	21,59±0,44^{c}	44,89±0,42^{de}	20,79±0,48^{b}	45,12±0,36^{bc}
F.P	Référence	40,26±0,41^{a}	47,4±0,16^{a}	34±0,69^{a}	46,97±0,29^{a}
	Esquive	39,77±0,34^{ab}	46,4±0,18^{ab}	32,64±0,73^{a}	46,01±0,31^{ab}
	Dérobée	22,19±0,29^{c}	45,51±0,3^{bcd}	21,06±0,23^{b}	45,52±0,26^{ab}
F.L	Référence	37,77±0,61^{b}	45,2±0,23^{cde}	32,35±0,94^{a}	43,96±0,41^{cd}
	Esquive	37,64±0,53^{b}	44,13±0,24^{ef}	31,98±0,89^{a}	43,16±0,41^{de}
	Dérobée	16,7±0,76^{d}	43,01±0,38^{f}	16,25±0,7^{c}	42,34±0,43^{e}

3. Simulations des risques de maladies fongiques

Les résultats présentés dans cette partie proviennent des simulations sur la plateforme X_Pest (ModelBuilder) avec les modèles construits pour chacune des maladies. Afin de permettre une visualisation des différences existantes entre les ITK et entre les sites, et afin de percevoir l'évolution du risque pour les trois maladies au cours du temps, nous avons choisi de synthétiser les résultats sur des cartes. Pour chaque situation (ITK × site × période), le risque de maladie est exprimé en proportion des années à risque fort, moyen ou faible avec des « camemberts » sur la période considérée. La différence de risques en fonction des ITK est appréciée par une lecture verticale, l'évolution au cours des périodes de temps pour chaque ITK par une lecture horizontale. Il faut noter que les ITK d'adaptation « esquive » et « irrigation » au sud ont les mêmes risques car ils partagent les mêmes dates de semis. Les résultats présentés sont valables pour les deux types du sol, car ce critère n'intervient pas dans notre modèle épidémiologique.

A. *Le phomopsis*

Nous présentons dans un premier point les résultats de l'évaluation de notre modèle de phomopsis sur des données régionales de Midi-Pyrénées provenant des BSV :

a] La qualité prédictive de modèle de phomopsis

Nous avons utilisé un test statistique de « matrice de confusion » pour évaluer la performance de notre modèle à prédire la nuisibilité de la maladie en tenant compte du nombre d'évènements d'infection et de passage sur tige. Les BSV étant des données régionales, les dates de semis n'étaient pas précisées. Nous avons eu recours à l'expertise pour avoir une date de semis moyenne du tournesol en Midi-Pyrénées d'où un premier test du modèle avec une date de semis le 15 avril. Nous avons obtenu les résultats présentés dans la figure 28.

La précision du modèle à simuler correctement le risque de la maladie est de 58%. Le coefficient de kappa pondéré quadratique est de 0.37 ce qui signifie un faible accord entre les classes observées et simulées. Le modèle simule les classes de risque faible et moyen avec des précisions de 81% et 60 % respectivement, tandis que la classe à risque moyen est simulée avec une précision de 30% uniquement.

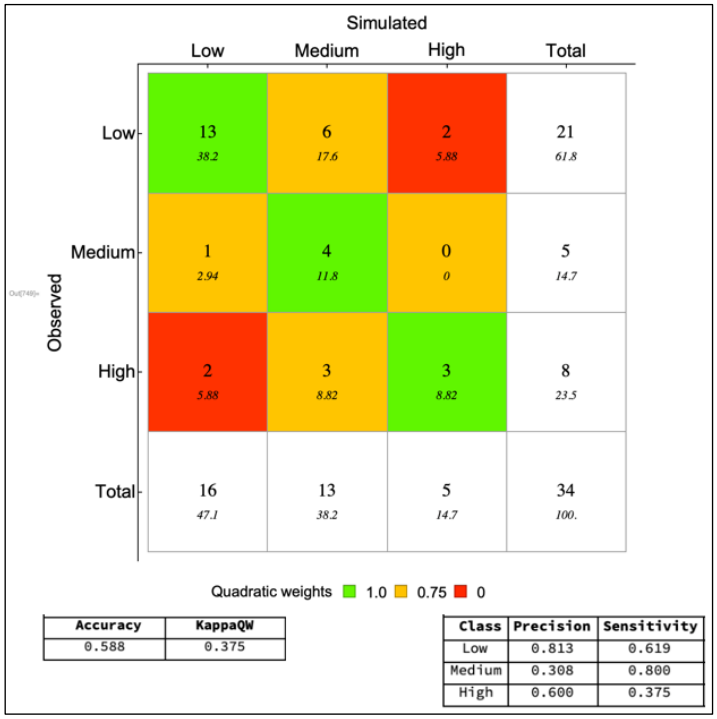

Figure 28. Evaluation de la qualité prédictive de modèle de nuisibilité de phomopsis avec une date de semis le 15 avril : matrice de confusion et paramètres statistiques de précision

Une deuxième tentative pour améliorer la qualité de prédiction du modèle a consisté à utiliser une de date de semis le 10 avril. La figure 29 ci-après montre les résultats obtenus :

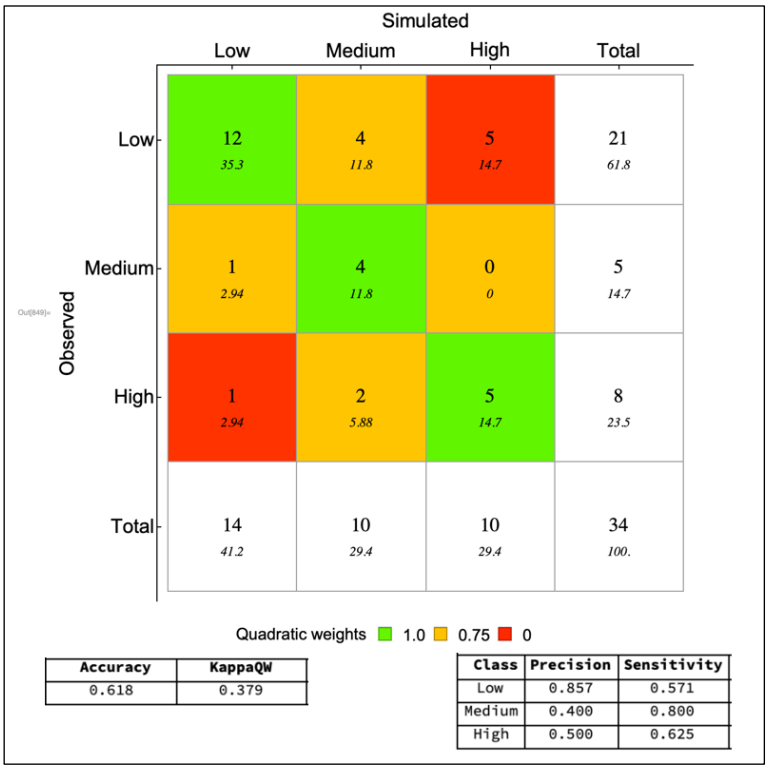

Figure 29. Evaluation de la qualité prédictive de modèle de nuisibilité de phomopsis avec une date de semis le 10 avril : matrice de confusion et paramètres statistiques de précision

On remarque que la précision globale du modèle passe à 61% avec une date de semis le 10 avril. Le coefficient de kappa pondéré quadratique quant à lui, reste à 0.37. Une amélioration de la qualité à prédire les classes à risque faible et moyen est observée. La précision de prédiction passe de 81% à 85% pour la classe faible et de 30% à 40 % pour la classe moyenne. En revanche, elle diminue pour la classe à fort risque passant ainsi de 60% à 50%.

b] Evolution de risque de la maladie

On remarque d'après la figure 30 que le risque de nuisibilité du phomopsis évalué sur le nombre d'évènements d'infection et sur le risque de passage sur tige est plus important sur les sites du nord que sur les sites du sud indépendamment des ITK et des périodes. Il est plus élevé avec l'ITK d'esquive (et l'irrigation au sud) par rapport aux ITK de référence et au dérobé et cela pour toutes les périodes et les sites. La troisième tendance globale à souligner est la diminution de risque de la maladie entre périodes quel que soit l'ITK et le site. Il diminue en F.P et F.L par rapport au présent. F.L est caractérisé par les risques les moins élevés traduits par : un passage de la classe « risque fort » à « risque moyen » pour l'ITK de référence et une proportion plus importante d'années à risque faible avec la culture dérobée.

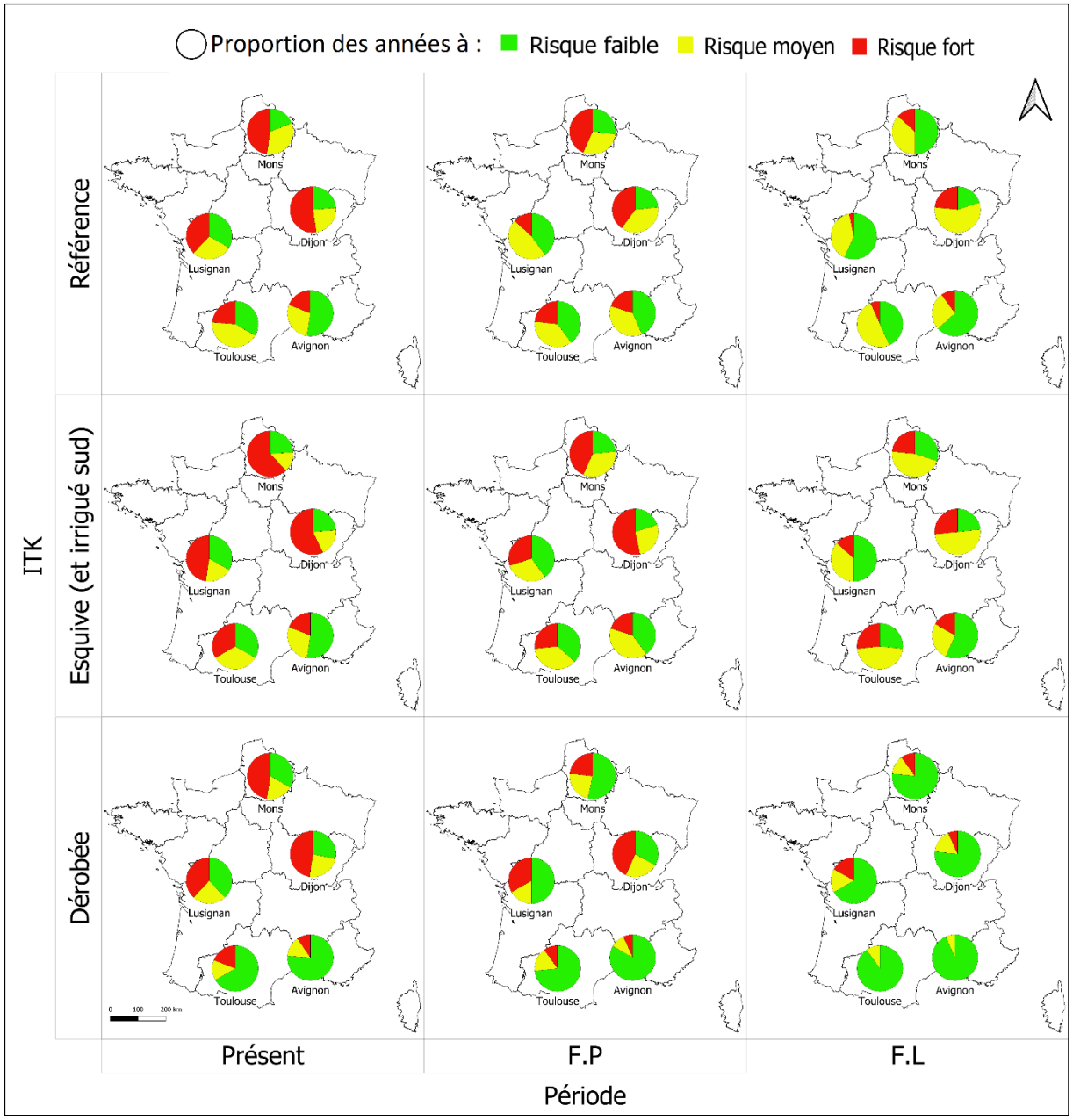

Figure 30. Evolution de risque de nuisibilité du phomopsis (infection combinée au passage sur tige) en fonction des périodes et des ITK.

B. *Le mildiou*

Les résultats présentés par la figure 31 montrent que les tendances d'évolution du risque d'infection par le mildiou sont variables en fonction des ITK et des périodes. Au présent et pour F.P, l'ITK « esquive » (et irrigation au sud) semble présenter les risques les plus faibles sur tous les sites, tandis qu'en F.L c'est la culture en dérobée qui induit les plus faibles risques (sauf pour le site de Lusignan). Le risque varie très peu au fil du temps avec l'ITK de référence surtout au nord et montre de faibles diminutions au sud. Le risque mildiou avec l'ITK d'esquive (et irrigation au sud) suggère une tendance à l'augmentation en F.P et F.L comparativement à la période présente et cela pour tous les sites. L'ITK de la culture dérobée montre des augmentations du risque en F.P sur l'ensemble des sites (à l'exception de Lusignan pour lequel le risque diminue plutôt). Cependant, il diminue en F.L pour tous les sites.

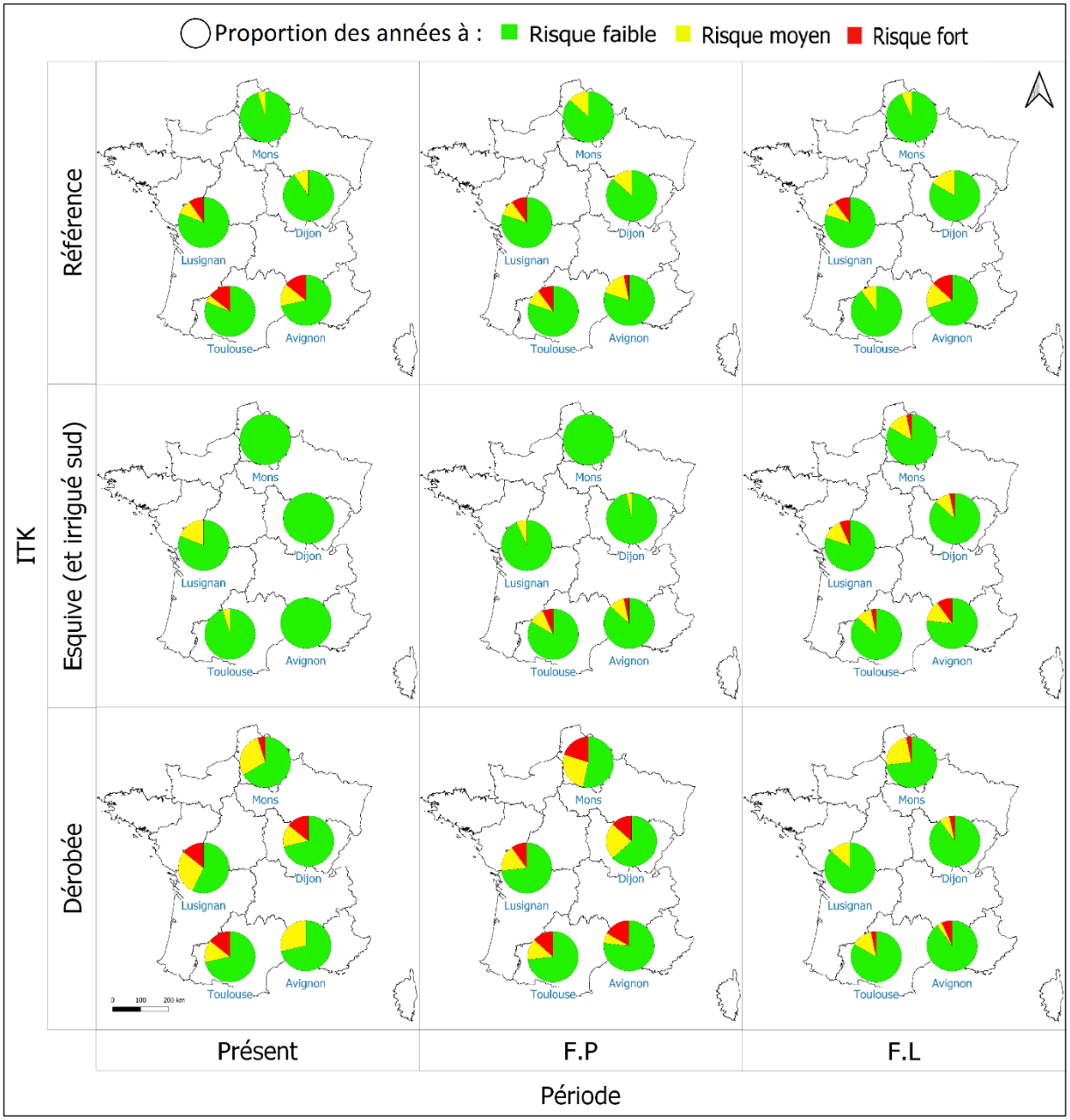

Figure 31. Evolution du risque d'infection des plantes par le mildiou en fonction des périodes et des ITK.

C. *Le sclérotinia du capitule*

Le risque d'infection par le sclérotinia capitule est faible sur l'ensemble des sites quel que soit l'ITK ou la période (Fig. 32). A l'exception du site d'Avignon sur lequel le risque augmenterait légèrement en F.P et F.L avec les ITK référence et esquive (et irrigation sud), il n'y a aucune évolution constatée sur les autres sites du sud comme du nord. Le risque demeure faible pour l'ensemble des ITK et des périodes.

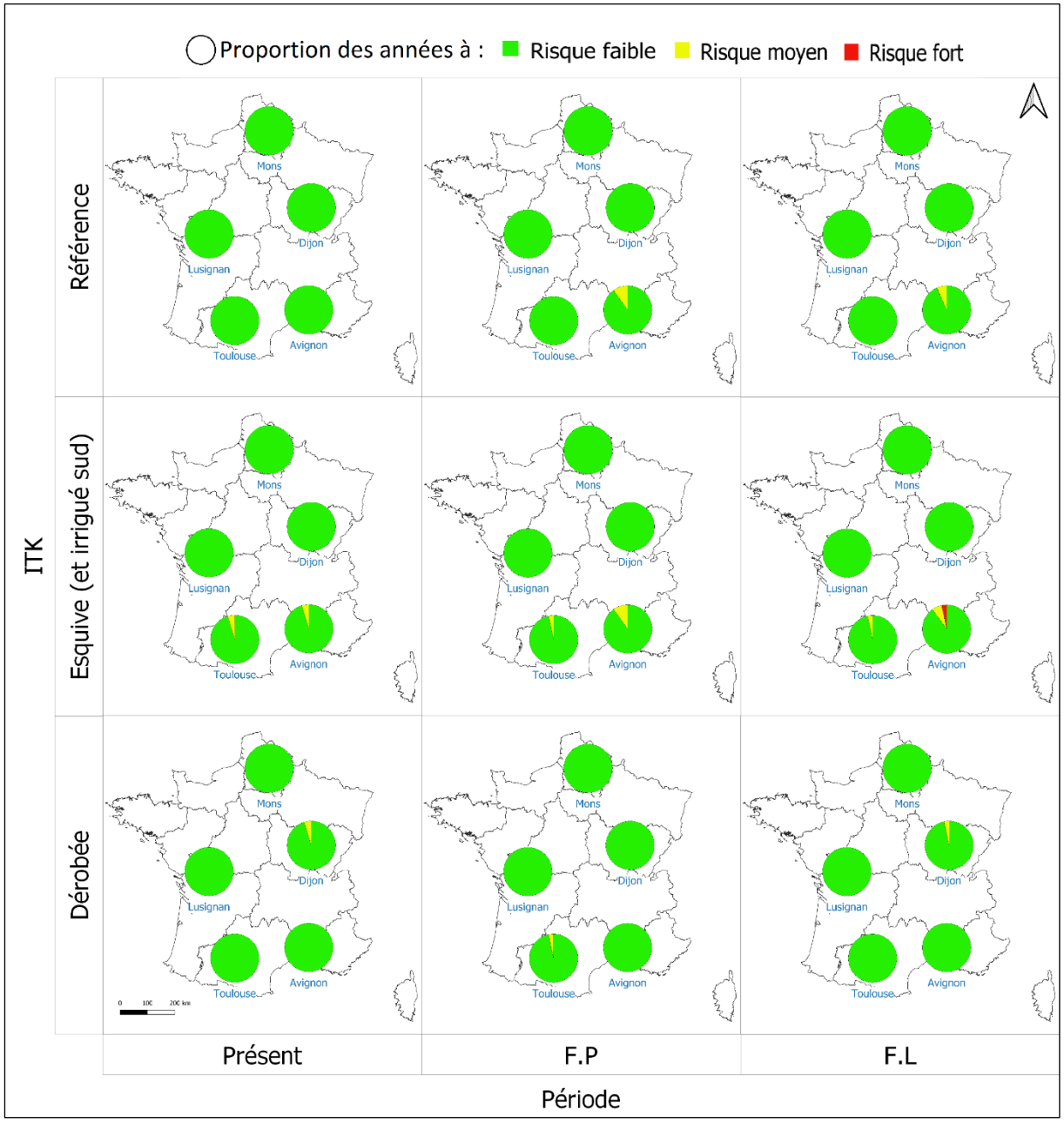

Figure 32. Evolution du risque d'infection par le sclérotinia du capitule en fonction des périodes et des ITK.

4. L'évaluation multicritère

A. *Sites du sud*

<u>Toulouse</u>

- Sol profond

Les performances des stratégies sur les trois périodes sont présentées dans la figure 33. On remarque que la stratégie d'esquive a une forte performance sur les trois périodes. La stratégie de référence a également une forte performance mais uniquement en F.P et F.L. La culture dérobée est caractérisée par une performance moyenne en présent et F.P mais passe au niveau « faible à moyenne » en F.L. En ce qui concerne la stratégie d'irrigation, sa performance est « faible à moyenne » en présent et F.L et « moyenne » en F.P.

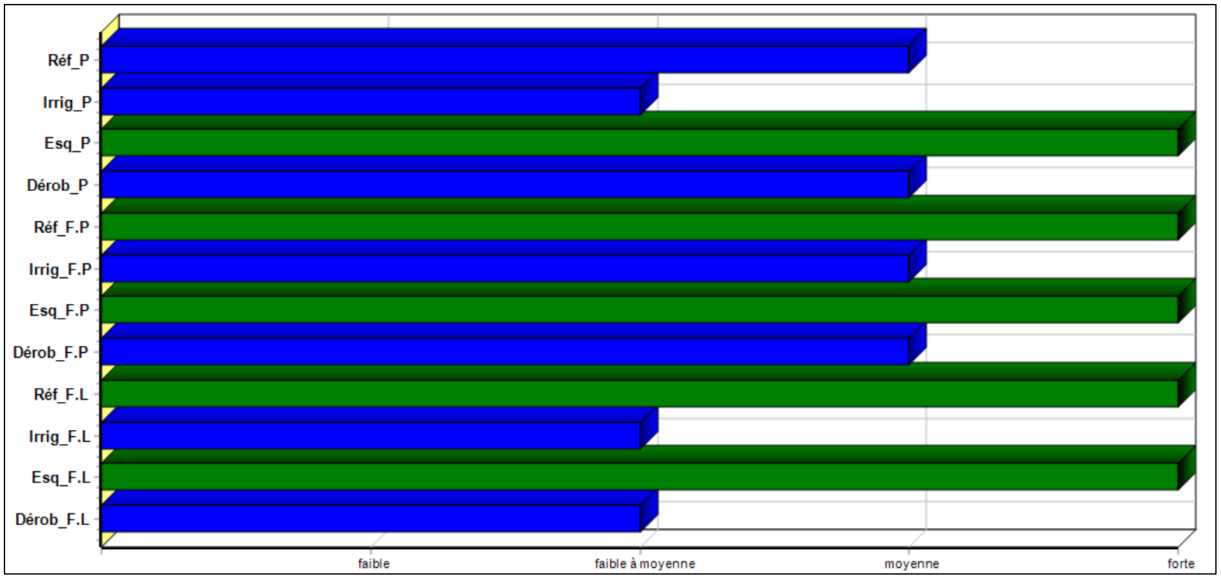

Figure 33. Evaluation de la performance des stratégies d'adaptation (Irrig : Irrigation ; Esq : Esquive ; Dérob : Dérobée) et de référence (Réf) pour les trois périodes de temps (P : Présent ; F.P : Futur Proche ; F.L : Futur Lointain), enun sol profond, site de Toulouse.

Pour avoir une idée plus claire sur les caractéristiques des stratégies à forte performance, les trois composantes évaluées pour chacune de ces stratégies sont illustrées dans les radars ci-après (Fig. 34). Il sort que toutes ces stratégies sont caractérisées par une forte production, un faible risque sanitaire et un impact moyen sur l'environnement.

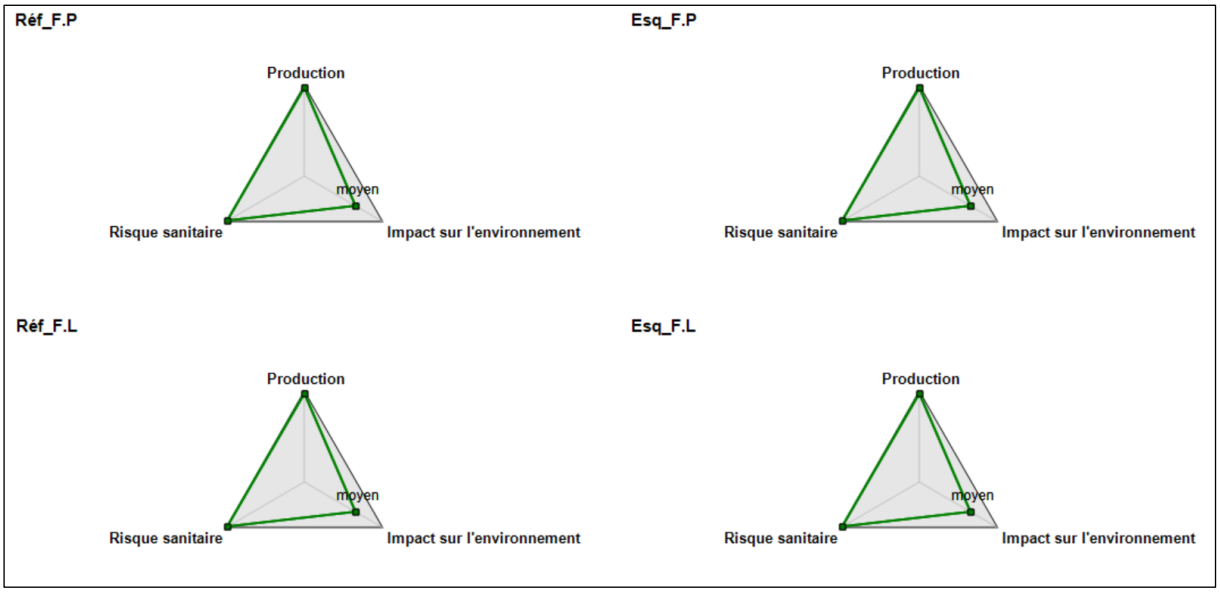

Figure 34. Radar des stratégies à forte performance. Site de Toulouse pour un sol profond.

En comparaison, la stratégie d'irrigation est caractérisée surtout par un impact fort sur l'environnement sur les trois périodes temporelles Sa production est « forte » en F.P mais elle est moyenne en présent et F.L. Le risque sanitaire est moyen en présent mais devient faible en F.P et F.L (figure 35).

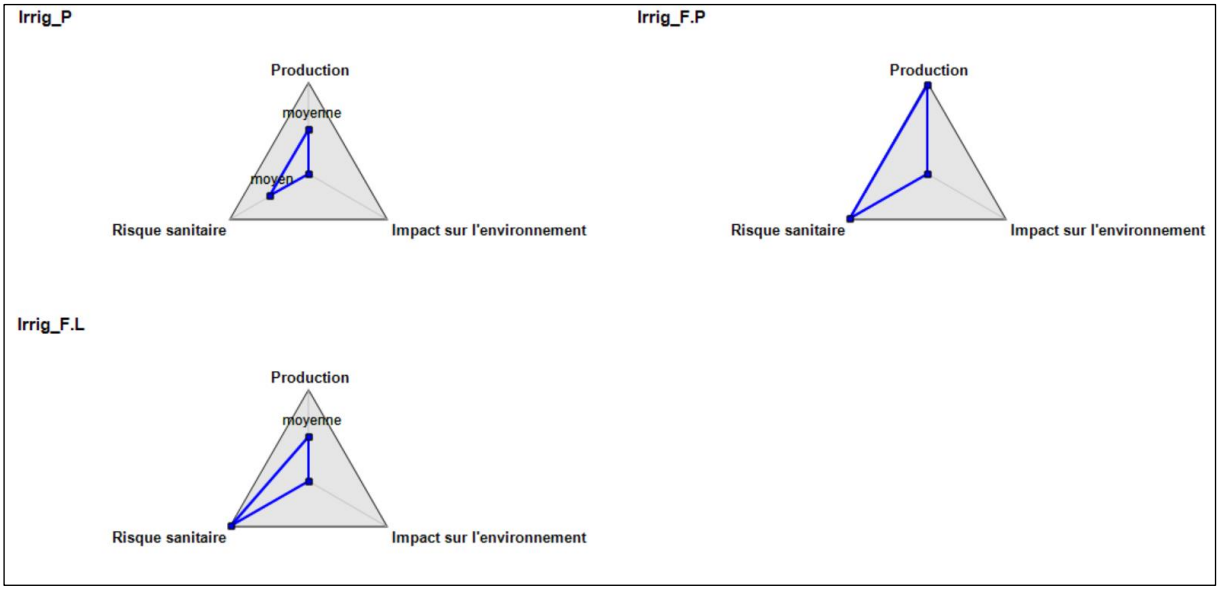

Figure 35. Radar de performance de la stratégie d'irrigation sur les trois périodes. Site de Toulouse pour un sol profond.

La culture dérobée quant à elle, présente un risque sanitaire faible tandis que son impact sur l'environnement est moyen et cela sur les trois périodes. Sa production passe d'un niveau « moyen » en présent et F.P à un niveau faible à moyen en F.L d'où les notes de performances globales « faible à moyenne » obtenues (Fig. 36).

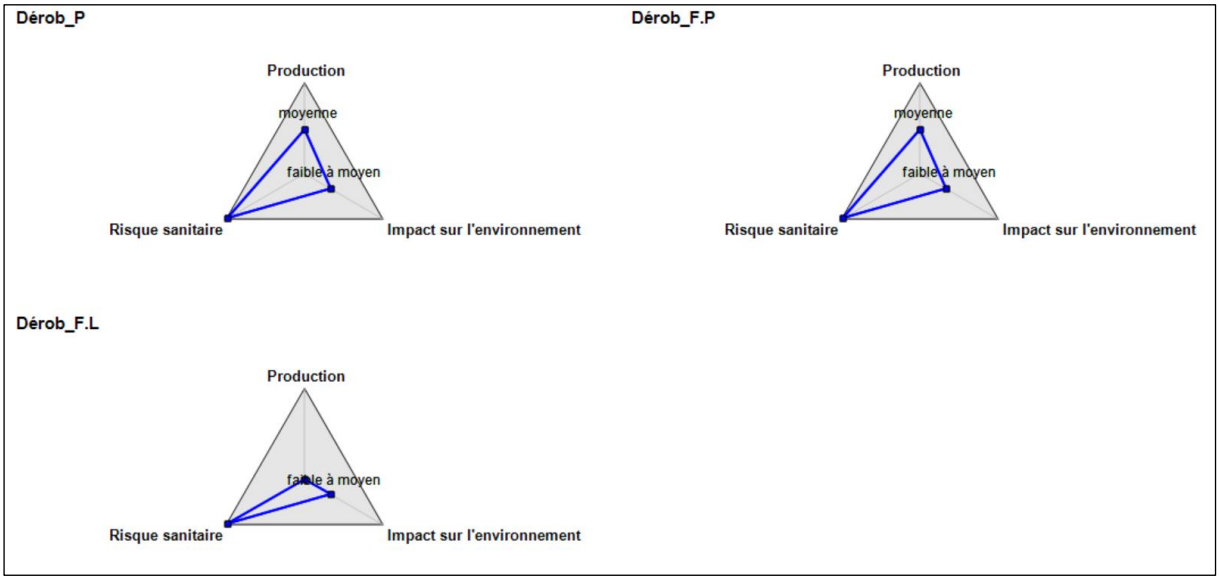

Figure 36. Radar de performance de la stratégie de dérobée sur les trois périodes. Site de Toulouse pour un sol profond.

- Sol superficiel

Les résultats du tableau 6 montrent que les performances de nos stratégies sont comprises entre le niveau « faible à moyenne » et le niveau « moyenne ». Aucune stratégie ne présente une forte performance quelle que soit la période. Les stratégies de référence et d'esquive ont un niveau de performance « moyenne » quelle que soit la période. La culture dérobée a également une performance moyenne en présent et F.P mais obtient un niveau « faible à moyenne » en F.L à cause de la dégradation de son niveau de production. La performance de la stratégie d'irrigation est « faible à moyenne » sur les trois périodes et cela en raison de son fort impact sur l'environnement et de sa performance de production « moyenne ».

Tableau 6. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Toulouse sur un sol superficiel.

Evaluation results

Attribute	Réf P	Irrig P	Esq P	Dérob P	Réf F.P
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	faible à moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Production	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Rentabilité	moyenne	moyenne	moyenne	faible	moyenne
Rendement accessible	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	moyen	moyen	faible	faible	faible
Risque phomopsis	moyen	moyen	moyen	fort	moyen
Risque infection_Mildiou	moyen	moyen	faible	faible	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	fort	moyen	faible à moyen	moyen
Pression sur les ressources	faible	forte	faible	forte	faible
Consommation en eau	faible	forte	faible	forte	faible
Consommation en énergie	modérée	élevée	modérée	élevée	modérée
Dépendance aux intrants	forte	forte	moyenne	faible	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	élevée	modérée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	traitement	pas de traitement	pas de traitement	traitement

Attribute	Irrig F.P	Esq F.P	Dérob F.P	Réf F.L	Irrig F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	faible à moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	faible à moyenne
Production	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Rentabilité	moyenne	moyenne	faible	moyenne	moyenne
Rendement accessible	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	mauvaise	mauvaise
Risque sanitaire	faible	faible	faible	faible	faible
Risque phomopsis	moyen	fort	moyen	moyen	faible
Risque infection_Mildiou	faible	faible	faible	faible	moyen
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	fort	moyen	faible à moyen	moyen	fort
Pression sur les ressources	forte	faible	forte	faible	forte
Consommation en eau	forte	faible	forte	faible	forte
Consommation en énergie	élevée	modérée	élevée	modérée	élevée
Dépendance aux intrants	forte	moyenne	faible	forte	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	modérée	élevée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	pas de traitement	pas de traitement	traitement	traitement

Attribute	Esq F.L	Dérob F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	faible à moyenne
Production	moyenne	faible
Rentabilité	moyenne	faible
Rendement accessible	moyen	faible
Richesse en huile	mauvaise	mauvaise
Risque sanitaire	faible	faible
Risque phomopsis	faible	faible
Risque infection_Mildiou	moyen	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	faible à moyen
Pression sur les ressources	faible	forte
Consommation en eau	faible	forte
Consommation en énergie	modérée	élevée
Dépendance aux intrants	moyenne	faible
Consommation d'engrais azoté	élevée	modérée
Consommation en produits phytosanitaires	pas de traitement	pas de traitement

Avignon

- Sol profond

En présent, les stratégies de référence, d'esquive, et la dérobée présentent une performance moyenne. La stratégie de référence et d'esquive passent à un niveau de performance « forte » en F.P. alors que la dérobée reste avec une performance moyenne. En F.L la stratégie d'esquive garde sa forte performance, la référence redevient moyenne et la dérobée passe à un niveau inférieur « faible à moyenne » (du fait de la dégradation de sa composante « production »). La stratégie d'irrigation a une performance « faible à moyenne » quelle que soit la période et cela à cause de son fort impact sur l'environnement qui n'est pas compensé par ses performances « moyennes » pour les composantes « production » et « risque sanitaire » (tableau 7).

Tableau 7. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de la référence à Avignon sur un sol profond sur les 3 périodes temporelles.

Evaluation results

Attribute	Réf_P	Irrig_P	Esq_P	Dérob_P	Réf_F.P
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	faible à moyenne	moyenne	moyenne	forte
Production	forte	moyenne	forte	moyenne	forte
Rentabilité	forte	moyenne	forte	faible	forte
Rendement accessible	fort	fort	fort	moyen	fort
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	moyen	faible	moyen	faible	faible
Risque phomopsis	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
Risque infection_Mildiou	moyen	faible	moyen	faible	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	fort	moyen	faible à moyen	moyen
Pression sur les ressources	faible	forte	faible	forte	faible
Consommation en eau	faible	forte	faible	forte	faible
Consommation en énergie	modérée	élevée	modérée	élevée	modérée
Dépendance aux intrants	forte	forte	moyenne	faible	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	élevée	modérée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	traitement	pas de traitement	pas de traitement	traitement

Attribute	Irrig_F.P	Esq_F.P	Dérob_F.P	Réf_F.L	Irrig_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	faible à moyenne	forte	moyenne	moyenne	faible à moyenne
Production	moyenne	forte	moyenne	moyenne	moyenne
Rentabilité	moyenne	forte	faible	moyenne	moyenne
Rendement accessible	fort	fort	moyen	fort	fort
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	moyen	faible	faible	moyen	faible
Risque phomopsis	moyen	moyen	moyen	moyen	faible
Risque infection_Mildiou	moyen	faible	faible	moyen	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	moyen	faible	faible
Impact sur l'environnement	fort	moyen	faible à moyen	moyen	fort
Pression sur les ressources	forte	faible	forte	faible	forte
Consommation en eau	forte	faible	forte	faible	forte
Consommation en énergie	élevée	modérée	élevée	modérée	élevée
Dépendance aux intrants	forte	moyenne	faible	forte	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	modérée	élevée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	pas de traitement	pas de traitement	traitement	traitement

Attribute	Esq_F.L	Dérob_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	forte	faible à moyenne
Production	forte	faible
Rentabilité	forte	faible
Rendement accessible	fort	faible
Richesse en huile	bonne	mauvaise
Risque sanitaire	faible	faible
Risque phomopsis	faible	faible
Risque infection_Mildiou	faible	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	faible à moyen
Pression sur les ressources	faible	forte
Consommation en eau	faible	forte
Consommation en énergie	modérée	élevée
Dépendance aux intrants	moyenne	faible
Consommation d'engrais azoté	élevée	modérée
Consommation en produits phytosanitaires	pas de traitement	pas de traitement

- Sol superficiel

Les tendances sont similaires à celles de Toulouse sauf concernant la culture dérobée en présent et F.P qui a une performance « faible à moyenne » (moyenne à Toulouse) car sa composante « production » se dégrade. Le risque sanitaire de l'ensemble des stratégies varie de faible à moyen. L'impact sur l'environnement est toujours fort pour la stratégie d'irrigation et la référence en présent, et « faible à moyen » ou « moyen » pour le reste des situations (tableau 8).

Tableau 8. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Avignon sur un sol superficiel pour es 3 périodes temporelles.

Evaluation results

Attribute	Réf_P	Irrig_P	Esq_P	Dérob_P	Réf_F.P
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	faible à moyenne	moyenne	faible à moyenne	moyenne
Production	moyenne	moyenne	moyenne	faible	moyenne
Rentabilité	moyenne	moyenne	moyenne	faible	moyenne
Rendement accessible	moyen	moyen	moyen	faible	moyen
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	moyen	faible	moyen	faible	faible
Risque phomopsis	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
Risque infection_Mildiou	moyen	faible	moyen	faible	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	fort	moyen	faible à moyen	moyen
Pression sur les ressources	faible	forte	faible	forte	faible
Consommation en eau	faible	forte	faible	forte	faible
Consommation en énergie	modérée	élevée	modérée	élevée	modérée
Dépendance aux intrants	forte	forte	moyenne	faible	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	élevée	modérée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	traitement	pas de traitement	pas de traitement	traitement

Attribute	Irrig_F.P	Esq_F.P	Dérob_F.P	Réf_F.L	Irrig_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	faible à moyenne	moyenne	faible à moyenne	moyenne	faible à moyenne
Production	moyenne	moyenne	faible	moyenne	faible
Rentabilité	moyenne	moyenne	faible	moyenne	faible
Rendement accessible	moyen	moyen	faible	moyen	moyen
Richesse en huile	bonne	bonne	mauvaise	mauvaise	mauvaise
Risque sanitaire	moyen	faible	faible	moyen	faible
Risque phomopsis	moyen	moyen	moyen	moyen	faible
Risque infection_Mildiou	moyen	faible	faible	moyen	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	moyen	faible	faible
Impact sur l'environnement	fort	moyen	faible à moyen	moyen	fort
Pression sur les ressources	forte	faible	forte	faible	forte
Consommation en eau	forte	faible	forte	faible	forte
Consommation en énergie	élevée	modérée	élevée	modérée	élevée
Dépendance aux intrants	forte	moyenne	faible	forte	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	modérée	élevée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	pas de traitement	pas de traitement	traitement	traitement

Attribute	Esq_F.L	Dérob_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	faible à moyenne
Production	moyenne	faible
Rentabilité	moyenne	faible
Rendement accessible	moyen	faible
Richesse en huile	mauvaise	mauvaise
Risque sanitaire	faible	faible
Risque phomopsis	faible	faible
Risque infection_Mildiou	faible	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	faible à moyen
Pression sur les ressources	faible	forte
Consommation en eau	faible	forte
Consommation en énergie	modérée	élevée
Dépendance aux intrants	moyenne	faible
Consommation d'engrais azoté	élevée	modérée
Consommation en produits phytosanitaires	pas de traitement	pas de traitement

B. *Sites du nord*

Dijon

- Sol profond

D'après le tableau 9, la performance des stratégies de référence et d'esquive sont similaires et passent de « forte » en présent et F.P à « moyenne » en F.L à cause d'une augmentation du niveau de risque sanitaire (de « faible » à « moyen »). La culture dérobée présente une performance moyenne sur les trois périodes.

Tableau 9. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Dijon sur un sol profond.

Evaluation results

Attribute	Réf_P	Esq_P	Dérob_P	Réf_F.P	Esq_F.P
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	forte	forte	moyenne	forte	forte
Production	forte	forte	faible	forte	forte
Rentabilité	forte	forte	faible	forte	forte
Rendement accessible	fort	fort	faible	fort	fort
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	faible	faible	faible	faible	faible
Risque phomopsis	fort	fort	moyen	fort	fort
Risque infection_Mildiou	faible	faible	faible	faible	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
Pression sur les ressources	faible	faible	moyenne	faible	faible
Consommation en eau	faible	faible	forte	faible	faible
Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée	modérée
Dépendance aux intrants	forte	forte	faible	forte	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	modérée	élevée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	traitement	pas de traitement	traitement	traitement

Attribute	Dérob_F.P	Réf_F.L	Esq_F.L	Dérob_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Production	moyenne	forte	forte	faible
Rentabilité	faible	forte	forte	faible
Rendement accessible	moyen	fort	fort	faible
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	mauvaise
Risque sanitaire	faible	moyen	moyen	faible
Risque phomopsis	moyen	fort	fort	faible
Risque infection_Mildiou	faible	moyen	moyen	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen
Pression sur les ressources	moyenne	faible	faible	moyenne
Consommation en eau	forte	faible	faible	forte
Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée
Dépendance aux intrants	faible	forte	forte	faible
Consommation d'engrais azoté	modérée	élevée	élevée	modérée
Consommation en produits phytosanitaires	pas de traitement	traitement	traitement	pas de traitement

- Sol superficiel

Quelle que soit la période, toutes les stratégies ont le même niveau de performance « moyenne ». La référence et l'esquive présentent des niveaux moyens de production et un risque sanitaire faible en présent et F.P mais moyen en F.L. L'ensemble des stratégies obtiennent un impact sur l'environnement. Les cultures dérobées ont des profils toujours faibles de production (tableau 10).

Tableau 10. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Dijon sur un sol superficiel.

Evaluation results

Attribute	Réf_P	Esq_P	Dérob_P	Réf_F.P	Esq_F.P
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Production	moyenne	moyenne	faible	moyenne	moyenne
Rentabilité	moyenne	moyenne	faible	moyenne	moyenne
Rendement accessible	moyen	moyen	faible	moyen	moyen
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	faible	faible	faible	faible	faible
Risque phomopsis	fort	fort	moyen	fort	fort
Risque infection_Mildiou	faible	faible	faible	faible	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
Pression sur les ressources	faible	faible	moyenne	faible	faible
Consommation en eau	faible	faible	forte	faible	faible
Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée	modérée
Dépendance aux intrants	forte	forte	faible	forte	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	modérée	élevée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	traitement	pas de traitement	traitement	traitement

Attribute	Dérob_F.P	Réf_F.L	Esq_F.L	Dérob_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Production	faible	moyenne	moyenne	faible
Rentabilité	faible	moyenne	moyenne	faible
Rendement accessible	faible	moyen	moyen	faible
Richesse en huile	bonne	mauvaise	mauvaise	mauvaise
Risque sanitaire	faible	moyen	moyen	faible
Risque phomopsis	moyen	fort	fort	faible
Risque infection_Mildiou	faible	moyen	moyen	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen
Pression sur les ressources	moyenne	faible	faible	moyenne
Consommation en eau	forte	faible	faible	forte
Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée
Dépendance aux intrants	faible	forte	forte	faible
Consommation d'engrais azoté	modérée	élevée	élevée	modérée
Consommation en produits phytosanitaires	pas de traitement	traitement	traitement	pas de traitement

Lusignan

- Sol profond

On remarque que les performances des stratégies de référence et d'esquive sont similaires. Elles passent de niveau « moyennes » en présent à « fortes » en F.P à cause de la diminution du risque sanitaire, puis elles redeviennent moyennes en F.L. La culture dérobée a une performance moyenne quelle que soit la période mais avec des profils différents de la référence et de l'esquive (tableau 11).

Tableau 11. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Lusignan sur un sol profond sur les 3 périodes temporelles.

Evaluation results

Attribute	Réf_P	Esq_P	Dérob_P	Réf_F.P	Esq_F.P
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	moyenne	moyenne	forte	forte
├Production	forte	forte	moyenne	forte	forte
│├Rentabilité	forte	forte	faible	forte	forte
│├Rendement accessible	fort	fort	moyen	fort	fort
│└Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
├Risque sanitaire	moyen	moyen	moyen	faible	faible
│├Risque phomopsis	fort	moyen	moyen	fort	moyen
│├Risque infection_Mildiou	moyen	moyen	moyen	faible	faible
│└Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
└Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
├Pression sur les ressources	faible	faible	moyenne	faible	faible
│├Consommation en eau	faible	faible	forte	faible	faible
│└Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée	modérée
└Dépendance aux intrants	forte	forte	faible	forte	forte
├Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	modérée	élevée	élevée
└Consommation en produits phytosanitaires	traitement	traitement	pas de traitement	traitement	traitement

Attribute	Dérob_F.P	Réf_F.L	Esq_F.L	Dérob_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
├Production	moyenne	forte	forte	faible
│├Rentabilité	faible	forte	forte	faible
│├Rendement accessible	moyen	fort	fort	faible
│└Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne
├Risque sanitaire	faible	moyen	moyen	faible
│├Risque phomopsis	moyen	fort	fort	faible
│├Risque infection_Mildiou	faible	moyen	moyen	faible
│└Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible
└Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen
├Pression sur les ressources	moyenne	faible	faible	moyenne
│├Consommation en eau	forte	faible	faible	forte
│└Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée
└Dépendance aux intrants	faible	forte	forte	faible
├Consommation d'engrais azoté	modérée	élevée	élevée	modérée
└Consommation en produits phytosanitaires	pas de traitement	traitement	traitement	pas de traitement

- Sol superficiel

A l'exception de la culture dérobée en présent qui a une performance « faible à moyenne », toutes les stratégies ont le même niveau de performance « moyenne » quelle que soit la période (tableau 12). La culture dérobée a toujours un profil différent des deux autres stratégies.

Tableau 12. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Lusignan sur un sol superficiel sur les 3 périodes temporelles.

Evaluation results

Attribute	Réf_P	Esq_P	Dérob_P	Réf_F.P	Esq_F.P
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	moyenne	faible à moyenne	moyenne	moyenne
├Production	moyenne	moyenne	faible	moyenne	moyenne
│├Rentabilité	moyenne	moyenne	faible	moyenne	moyenne
│├Rendement accessible	moyen	moyen	faible	moyen	moyen
│└Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
├Risque sanitaire	moyen	moyen	moyen	faible	faible
│├Risque phomopsis	fort	moyen	moyen	fort	moyen
│├Risque infection_Mildiou	moyen	moyen	moyen	faible	faible
│└Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
└Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
├Pression sur les ressources	faible	faible	moyenne	faible	faible
│├Consommation en eau	faible	faible	forte	faible	faible
│└Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée	modérée
└Dépendance aux intrants	forte	forte	faible	forte	forte
├Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	modérée	élevée	élevée
└Consommation en produits phytosanitaires	traitement	traitement	pas de traitement	traitement	traitement

Attribute	Dérob_F.P	Réf_F.L	Esq_F.L	Dérob_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
├Production	faible	moyenne	moyenne	faible
│├Rentabilité	faible	moyenne	moyenne	faible
│├Rendement accessible	faible	moyen	moyen	faible
│└Richesse en huile	bonne	mauvaise	mauvaise	mauvaise
├Risque sanitaire	faible	moyen	moyen	faible
│├Risque phomopsis	moyen	fort	fort	faible
│├Risque infection_Mildiou	faible	moyen	moyen	faible
│└Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible
└Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen
├Pression sur les ressources	moyenne	faible	faible	moyenne
│├Consommation en eau	forte	faible	faible	forte
│└Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée
└Dépendance aux intrants	faible	forte	forte	faible
├Consommation d'engrais azoté	modérée	élevée	élevée	modérée
└Consommation en produits phytosanitaires	pas de traitement	traitement	traitement	pas de traitement

Mons

- Sol profond

Les performances des stratégies de référence et d'esquive sont fortes en présent et en F.P. Cependant, en F.L uniquement la stratégie de référence maintient sa forte performance mais la performance de la stratégie d'esquive passe à la classe « moyenne ». La culture dérobée est moyennement performante quelle que soit la période mais ses profils sont différents des autres stratégies (tableau 13).

Tableau 13. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Mons sur un sol profond sur les 3 périodes temporelles.

Evaluation results

Attribute	Réf_P	Esq_P	Dérob_P	Réf_F.P	Esq_F.P
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	forte	forte	moyenne	forte	forte
Production	forte	forte	faible	forte	forte
Rentabilité	forte	forte	faible	forte	forte
Rendement accessible	fort	fort	faible	fort	fort
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	faible	faible	faible	faible	faible
Risque phomopsis	fort	fort	moyen	fort	fort
Risque infection_Mildiou	faible	faible	faible	faible	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
Pression sur les ressources	faible	faible	moyenne	faible	faible
Consommation en eau	faible	faible	forte	faible	faible
Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée	modérée
Dépendance aux intrants	forte	forte	faible	forte	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	modérée	élevée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	traitement	pas de traitement	traitement	traitement

Attribute	Dérob_F.P	Réf_F.L	Esq_F.L	Dérob_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	forte	moyenne	moyenne
Production	faible	forte	forte	faible
Rentabilité	faible	forte	forte	faible
Rendement accessible	faible	fort	fort	faible
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	faible	faible	moyen	faible
Risque phomopsis	moyen	fort	moyen	faible
Risque infection_Mildiou	faible	faible	moyen	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen
Pression sur les ressources	moyenne	faible	faible	moyenne
Consommation en eau	forte	faible	faible	forte
Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée
Dépendance aux intrants	faible	forte	forte	faible
Consommation d'engrais azoté	modérée	élevée	élevée	modérée
Consommation en produits phytosanitaires	pas de traitement	traitement	traitement	pas de traitement

- Sol superficiel

La performance est indifférente en fonction des stratégies et des périodes. Toutes les stratégies partagent le niveau de performance « moyenne » mais avec des profils différents de la culture dérobée a (tableau 14).

Tableau 14. Résultats d'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation et de référence à Mons sur un sol profond sur les 3 périodes temporelles.

Evaluation results

Attribute	Réf_P	Esq_P	Dérob_P	Réf_F.P	Esq_F.P
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Production	moyenne	moyenne	faible	moyenne	moyenne
Rentabilité	moyenne	moyenne	faible	moyenne	moyenne
Rendement accessible	moyen	moyen	faible	moyen	moyen
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	faible	faible	faible	faible	faible
Risque phomopsis	fort	fort	moyen	fort	fort
Risque infection_Mildiou	faible	faible	faible	faible	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen
Pression sur les ressources	faible	faible	moyenne	faible	faible
Consommation en eau	faible	faible	forte	faible	faible
Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée	modérée
Dépendance aux intrants	forte	forte	faible	forte	forte
Consommation d'engrais azoté	élevée	élevée	modérée	élevée	élevée
Consommation en produits phytosanitaires	traitement	traitement	pas de traitement	traitement	traitement

Attribute	Dérob_F.P	Réf_F.L	Esq_F.L	Dérob_F.L
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Production	faible	moyenne	moyenne	faible
Rentabilité	faible	moyenne	moyenne	faible
Rendement accessible	faible	moyen	moyen	faible
Richesse en huile	bonne	bonne	bonne	bonne
Risque sanitaire	faible	faible	moyen	faible
Risque phomopsis	moyen	fort	moyen	faible
Risque infection_Mildiou	faible	faible	moyen	faible
Risque infection_Sclérotinia	faible	faible	faible	faible
Impact sur l'environnement	moyen	moyen	moyen	moyen
Pression sur les ressources	moyenne	faible	faible	moyenne
Consommation en eau	forte	faible	faible	forte
Consommation en énergie	modérée	modérée	modérée	modérée
Dépendance aux intrants	faible	forte	forte	faible
Consommation d'engrais azoté	modérée	élevée	élevée	modérée
Consommation en produits phytosanitaires	pas de traitement	traitement	traitement	pas de traitement

Les meilleures stratégies par période, site et type du sol sont récapitulées dans le tableau 15.

Tableau 15. Synthèses des meilleures stratégies en termes de performance par situation d'après l'évaluation multicritère. Les couleurs du texte indiquent les niveaux de performance : vert = forte ; bleu = moyenne.

Région	Site	Type du sol	Présent	F.P	F.L
Sud	Toulouse	Profond	Esquive	Référence et esquive	Référence et esquive
		Superficiel	Référence, esquive et dérobée	Référence, esquive et dérobée	Référence et esquive
	Avignon	Profond	Référence, esquive et dérobée	Référence et esquive	Esquive
		Superficiel	Référence et esquive	Référence et esquive	Référence et esquive
Nord	Dijon	Profond	Référence et esquive	Référence et esquive	Référence, esquive et dérobée
		Superficiel	Référence, esquive et dérobée	Référence, esquive et dérobée	Référence, esquive et dérobée
	Lusignan	Profond	Référence, esquive et dérobée	Référence et esquive	Référence, esquive et dérobée
		Superficiel	Référence et esquive	Référence, esquive et dérobée	Référence, esquive et dérobée
	Mons	Profond	Référence et esquive	Référence et esquive	Référence
		Superficiel	Référence, esquive et dérobée	Référence, esquive et dérobée	Référence, esquive et dérobée

On s'aperçoit que dans la majorité des situations, plusieurs stratégies partagent le même niveau de performance qui est souvent moyenne. Dans deux situations uniquement une stratégie se démarque des autres avec un niveau de performance « forte » : l'esquive à Avignon en F.L sur un sol profond et la référence à Mons en F.L sur un sol profond également.

Partie 5
Discussion

1. Résultats

A. *Climat et performances de production*

Les résultats de l' analyse des données climatiques que ce soient de pluviométrie ou de température, confirment bien les impacts prévus du changement climatique en agriculture en général et sur la culture de tournesol (Debaeke *et al,* 2017b). L'amplitude de ces changements telle qu'attendue avec le scénario RCP 8.5 parait assez importante et risque de remettre en cause la caractéristique du tournesol comme culture tolérante à la sécheresse dans le futur, d'où la nécessité de réfléchir sur des stratégies d'adaptation (Donatelli *et al,* 2012 ; Miladinović *et al,* 2019). Contrairement à la période Présent caractérisée par des augmentations des moyennes de pluviométrie et des augmentations légères de température, le F.P sera marqué par des diminutions remarquables de pluviométrie et des augmentations de température. En F.L, ces diminutions de précipitations et augmentations de température semblent prendre une amplitude encore plus importante notamment pendant des phases sensibles de la culture et cela au nord comme au sud de la France.

Les stratégies d'adaptation conçues dans notre travail pour faire face à ce changement du climat, et simulées avec le modèle de culture SUNFLO donnent des résultats très hétérogènes en termes de production. Il n'y a pas de tendance claire au sein des sites, mais la tendance générale est à la baisse dans le futur que ce soit pour le rendement ou la teneur en huile et cela pour l'ensemble des sites et des stratégies étudiés.

La pertinence des stratégies d'adaptation en réponse au climat varie en fonction des périodes et des sites. Elles donnent des résultats similaires ou inférieures à ceux de la référence dans plusieurs cas et notamment sur les sols profonds. Les stratégies d'esquive et d'irrigation montrent des intérêts pour le rendement dans quelques situations surtout sur les sols superficiels en F.P et F.L. Nous pensons que l'absence de ces intérêts sur les sols profonds est due à leur réserve utile importante qui compense les effets souhaités de l'irrigation et de l'esquive par rapport à la référence.

La culture dérobée a des rendements nettement plus bas que les autres stratégies dans la majorité des situations en raison de son cycle très court. Cette constatation est encore plus claire sur les sols superficiels que ne permettent pas de valoriser l'irrigation aussi bien que sur les sols profonds. De même, cette stratégie n'arrive à maintenir des teneurs en huile proches de celles des autres stratégies que dans certaines situations notamment au F.L.

B. *Les risques de maladies fongiques*

Les modèles construits nous permettent de simuler des tendances d' évolution différentes selon la maladie, la région et la stratégie. Les résultats de simulation nous ont permis de constater :

- Pour le **phomopsis**, la culture dérobée présente moins de risque par rapport aux autres stratégies et cela sur tous les sites et pour toutes les périodes. Cela vient probablement de la diminution du nombre d'évènements d'infection et de passage sur tige en période estivale à cause du manque de précipitations et des températures élevées. Les risques résultants de la stratégie d'esquive et d'irrigation sont similaires à ceux de la référence. Sur l'échelle temporelle, le risque diminue en F.P et F.L par rapport au présent quels que soient le site et la stratégie. Il semble qu'il y aura de moins en moins de conditions favorables au développement de la maladie, ou de coïncidence entre la phase de réceptivité du tournesol et de contamination de la maladie. La diminution de risque dans le futur est plus importante au sud qu'au nord vu les conditions climatiques différentes entre les deux zones géographiques. Le climat au nord reste plus favorable aux évènements de contamination (pluies plus abondantes et température moins élevée).

- Les stratégies d'esquive et d'irrigation présentent moins de risque d'infection par le **mildiou** par rapport à la référence et à la culture dérobée. On peut bien imaginer que le semis précoce de ces deux stratégies permet d'échapper aux évènements de contamination de la maladie en présent et F.P. En revanche cette tendance est inversée en F.L, il semble que les évènements de contamination se décalent sur des périodes plus précoces (au moins 15 jours dans notre cas) et coïncident avec les dates de semis précoces ce qui

augmente le risque d'infection. C'est dans la même optique que le risque diminue dans le F.L pour les stratégies de référence et la dérobée.

- Pour le **sclérotinia du capitule**, le risque simulé est souvent faible indépendamment des stratégies et sites et n'évolue pas entre périodes. Il semble que le changement du climat prévu dans le futur n'induise aucune évolution du risque de la maladie pendant la phase de réceptivité du tournesol.

Ces tendances simulées dans notre cas d'étude contredisent les résultats obtenus dans d'autres études et sur d'autres maladies de culture. Les travaux de Gaubel *et al.,* (2017) et Launay *et al.,* (2020) ont montré une augmentation de fréquence et d'intensité de la rouille brune du blé sous climat futur. Toutefois, l'approche de regarder le synchronisme entre les phases de contaminations des pathogènes et de réceptivité de la culture utilisée dans notre travail reste intéressante. Ces résultats différents permettent de mieux caractériser l'impact des variations climatiques intra et interannuelles en fonction de type de culture (culture d'hiver vs. culture d'été).

C. *L'évaluation multicritère*

D'après les choix faits sur les critères et leur pondération, les stratégies d'adaptation ne montrent pas de performance avantageuse à celle de la référence au nord comme au sud. En gros, il n'en sort pas une meilleure stratégie par situation mais plutôt plusieurs stratégies qui partagent le même niveau de performance. Généralement, c'est la stratégie d'esquive qui a le même niveau de performance que la référence. Les niveaux de performance semblent très dépendants de la composante « production », non seulement parce qu'elle a le poids relatif le plus important mais parce qu'elle discrimine le plus les stratégies par rapport aux autres composantes. Cette constatation est plus marquée en comparant la performance d'une stratégie sur un sol profond par rapport à un sol superficiel. C'est aussi la raison pour laquelle la performance de la stratégie d'irrigation reste inférieure aux autres stratégies car sa composante « production » est similaire aux stratégies d'esquive et à la référence et ne compense pas son fort impact sur l'environnement. La culture dérobée quant à elle, malgré sa composante « production » faible, parait plus adaptée au sol superficiel et notamment au nord où elle arrive à atteindre des performances similaires à celles de la référence et de l'esquive.

La diversité des profils de performances est souvent présente entre des stratégies qui partagent le même niveau global. Le fait que pour une même note globale on puisse avoir des sous composantes très différentes, laisse penser qu'avec d'autres choix de pondérations, on aurait avoir très certainement des résultats différents de l'analyse et notamment pour la culture dérobée.

2. Limites et simplifications du travail

Plusieurs limites et simplification ont été faites pour conduire cette étude, entrainant ainsi des limites au travail réalisé. Il est important de souligner ces limites et de les considérer afin de prendre le recul nécessaire sur l'ensemble des résultats produits et envisager des pistes de travail :

A. *Retour sur la méthodologie*

a] Simplification des processus biologiques des maladies

Dans ce travail, le pathosystème n'est pas pris en compte dans son ensemble, nous avons uniquement évoqué les risques des maladies par rapport aux conditions climatiques favorables/défavorables. Or en réalité, les interactions plante-pathogène-environnement sont plus complexes que ça. L'interaction plante-pathogène est partiellement traitée par le lien de sommes degrés jours pour cadrer les phases de sensibilité. Des travaux ont déjà mis en évidence la relation entre le développement du couvert végétal (indice LAI par exemple) et les pratiques culturales d'une part et la sévérité des maladies fongiques (Debaeke *et al.,* 2003 ; Desanlis *et al.,* 2014). Nous n'avons pas pu représenter ces facteurs dans nos modèles par manque de temps mais également car les stratégies étaient réfléchies à l'échelle de la parcelle et sont loin d'être décrites

finement, toutes les pratiques culturales ne sont pas prises en compte (ex : travail du sol, gestion des résidus…)

En revenant sur la définition des phases de sensibilité notamment pour le phomopsis, le risque d'infection est évalué sur la fenêtre E1-F1. Alors qu'en réalité, l'incidence de la maladie dépend du moment où l'infection a eu lieu sur cette phase. Les infections qui arrivent tôt après E1 sont censées causer des dégâts plus importants que des infections tardives. Le passage du phomopsis sur tige quant à lui, peut être bloqué par la présence d'une autre maladie, le phoma (compétition entre les deux maladies). Dans ce cas de figure, l'incidence de la maladie est très réduite voire nulle.

Le dégrée de résistance génétique n'est pas intégré aux modèles de prédiction de risque. En fait, il peut être représenté par des fonctions de nuisibilité sur la perte de rendement. Nous n'étions pas dans cette optique car la perte de rendement qui peut résulter d'une attaque maladie est prise en compte dans le risque sanitaire pour évaluer la performance d'une stratégie. Il aurait été peu pertinent de renseigner à la fois un risque sanitaire et une perte de rendement due aux maladies dans l'estimation du rendement.

La quantité d'inocula primaires est considérée non limitante dans nos hypothèses pour des raisons de simplification, alors que l'idée d'étendre la culture de tournesol au nord du pays est encouragée par l'hypothèse que les inocula primaires sont limités au nord comme la culture est y moins répandue, ci peut être une contradiction.

Une autre variable que nous n'avons pas pris en compte est la différence de sommes de degrés jours pour atteindre les phases de réceptivité de la culture. Nous avons mobilisé les mêmes sommes de degrés jours pour les trois classes de précocité variétales utilisées dans les stratégies. Par la suite, il serait possible de mieux rendre compte des classes de précocité en adaptant les valeurs des paramètres des modèles renseignant les sommes de degrés jours des phases.

Enfin, les conditions qui bloquent le développement des maladies n'ont pas été évoquées. Certains évènements climatiques peuvent provoquer un arrêt irréversible du développement des champignons. Ainsi, on traite ces agents pathogènes tel qu'on les connait aujourd'hui mais leur génétique est susceptible d'évoluer dans le futur.

b] Incertitude liée à la modélisation

Les données climatiques utilisées proviennent déjà de simulation par d'autres modèles ce qui crée une certaine incertitude sur les résultats. La nature journalière de ces données nous permet d'estimer si un jour donné est favorable ou pas à un évènement de contamination. La réalité est plus complexe, plusieurs évènements de contamination peuvent se produire en une seule journée.

Les résultats de confrontation des sorties du modèle phomopsis aux données d'observation des BSV (Bulletins de santé du végétal) révèle quelques défauts de la qualité prédictive du modèle. On ne sait pas exactement comment les notations sont établies sur ces bulletins. D'autres facteur sont également inconnus tels que le degré de résistance génétique des variétés et les dates de semis. Ainsi, les bulletins donnent accès à une synthèse du risque à l'échelle régionale alors qu'on a utilisé des données climatiques de la station d'Auzeville Tolosane pour les simulations.

En ce qui concerne le modèle SUNFLO, aucune calibration ni validation préalable du modèle n'ont été faites dans notre cas d'étude. A la base, il a été calibré et validé pour simuler essentiellement des situations de production du bassin sud-ouest de la France (Casadebaig *et al.,* 2011). Sa qualité prédictive en dehors des conditions de cette région reste à prouver et à discuter.

Un autre point concerne les irrigations systématiques pour la levée et autour de la floraison : en fait, aucune règle de décision n'a été implémentée pour éviter ces irrigations en cas de pluie. Ceci peut générer des surestimations non justifiées de production et d'impact sur l'environnement pour la stratégie d'irrigation et dans une moindre mesure pour la culture dérobée.

c] Un modèle d'évaluation multicritère « incomplet »

Le nombre d'indicateurs qu'on disposait pour renseigner les critères de base était très limité ce qui a généré une arborescence très simplifiée du modèle d'évaluation multicritère. D'autre critères de base et/ou agrégés peuvent être rajoutés pour les trois piliers (e.g. d'autres risques sanitaires telles que les mauvaises herbes). Nous n'avions pas beaucoup de choix dans notre cas car les stratégies ne sont pas finement décrites. Les stratégies ont été réfléchies au départ en fonction de ce que le modèle de culture SUNFLO est capable de simuler.

Dans le pilier production, la marge brute est un indicateur peu pertinent pour évaluer le potentiel économique des stratégies dans notre cas. Les charges opérationnelles étant peu variables entre stratégies, font que la marge brute est quasi proportionnelle au produit et donc au rendement. Ceci crée une certaine redondance entre le potentiel économique et le rendement comme critères.

Les indicateurs de pilier « impact sur l'environnement » renseignés par des données d'entrée (quantité d'eau apportée, unités d'azote apportée, consommation d'énergie) sont le segment le plus faible du modèle. Ils sont peu pertinents et ne varient qu'en fonction des stratégies indépendamment du contexte pédoclimatique. En fait, pour évaluer les impacts environnementaux on peut recourir à des indicateurs de pratiques, démissions ou d'impacts. Les premiers sont facilement accessibles mais moins pertinents car ne prenant pas en compte la sensibilité du milieu (comme ceux qu'on a utilisé dans cette étude). Les indicateurs d'émission et d'impacts sont plus pertinents car prenant mieux en compte les processus d'interaction avec le milieu, mais ils sont renseignés plus difficilement.

En ce qui concerne les poids relatifs à donner à chacun des critères, nous avons opté pour la méthode de pondération. En fait, les pondérations souhaitées sont rarement atteintes dans DEXi. Souvent, ce sont des approximations qu'on obtient. Dans notre cas on a obtenu des pondérations proches mais pas tout à fait exactes (annexe 4).

L'idéal aurait était plutôt de renseigner toutes les règles de décision (chaque combinaison possible) à l'aide des experts de la filière. Une démarche participative en mobilisant un groupe d'acteurs de la filière aurait permis de rendre en compte de leurs préférences et d'évaluer les stratégies au regard de leurs attentes. Malheureusement, cette option n'était pas envisageable dans les conditions de ce stage.

Ainsi, la variabilité interannuelle intégrée dans les indicateurs des maladies n'est pas valorisée pour d'autres aspects comme le rendement car on a considéré des valeurs moyennes par période. Il est intéressant de à des indicateurs qui pour renseigner les niveaux de variabilité interannuelle vis-à-vis du changement climatique.

B. *Retour sur les résultats*

Les rendements simulés avec le modèle SUNFLO semblent surestimés et sont supérieurs à 40q/ha dans certaines situations. Ceci se répercute directement sur les valeurs de marge brute qui dépassent 1500 € dans certains cas ce qui est très élevé par rapport aux chiffres publiées sur la production du tournesol.

Les résultats sur les risques de maladies et malgré qu'ils restent très originaux, mais il faut noter qu'ils ne reflètent ces risques que partiellement. On ne parle que de risque « infection » pour le mildiou et le sclérotinia, et d'un risque composé d'infection de de passage sur tige pour le phomopsis. L'incidence d'une maladie fongique dépend de tout le processus biologique de son développement sur la plante.

Les résultats de l'évaluation multicritère que le modèle est peu sensible à nos stratégies telles qu'elles sont décrites. Les tendances peuvent changer en changeant les règles de décisions et les valeurs de seuillage qu'on a choisi. Nous supposons que les résultats obtenus pour la culture dérobée ne montrent pas les vraies performances de cette stratégie notamment en termes de marge brute. En réalité, la culture dérobée est un surplus pour l'agriculteur qui vient contribuer à sa rémunération et valoriser des cultures principales sur la

même compagne. Elle mérite d'être évaluée à l'échelle « système de culture » pour mieux valoriser ces atouts.

3. Perspectives

Afin d'aller plus loin dans l'évaluation des risques de maladies, les modèles construits lors de ce travail restent à développer et à améliorer. Les règles de décisions et les conditions définies comme favorables aux évènements de contamination sont à discuter. Des liens avec le développement de la plante sont également nécessaires pour mieux représenter les processus d'interaction plante-pathogène.

Afin d'avoir une évaluation plus complète des stratégies d'adaptation, nous conseillons de partir sur réflexion « système de culture » et non pas « itinéraire technique ». Les stratégies méritent d'être décrites avec plus de détails. Le modèle d'évaluation multicritère proposé dans ce travail n'est qu'un premier prototype à développer pour prendre en compte d'autres critères de performance des stratégies. D'autres maladies de la culture peuvent être intégrées éventuellement. Il est nécessaire de revoir certains indicateurs utilisés pour renseigner les critères. L'utilisation d'un modèle de système de culture type STICS ou CropSyst peut résoudre le problème d'indicateurs environnementaux et donner plus de choix pour les critères. Ainsi, les valeurs seuils définies pour chacun des indicateurs méritent d'être révisées. Pour ce faire, une démarche participative avec des acteurs de la filière est une piste éventuelle qui permet de réajuster et de valider le présent modèle d'évaluation multicritère mais aussi de tester d'autres pondérations selon les préférences de ces acteurs. Pour mieux explorer les tendances du futur, d'autres scénarios RCP peuvent être mobilisés également.

Conclusion

L'objectif de cette étude était de produire des indicateurs pour renseigner l'évolution des risques de maladies fongiques majeures du tournesol, afin de les intégrer dans une évaluation multicritère de stratégies d'adaptation de la culture face au changement climatique. Afin de remplir cet objectif, des modèles de prédiction de risque ont été construits en utilisant la plateforme X_Pest pour trois maladies représentatives de risque sanitaire de la culture : le phomopsis, le mildiou et le sclérotinia du capitule. Un modèle a été ensuite développé pour évaluer en multicritères la performance des stratégies d'adaptation conçues et cela sur cinq sites représentatifs des différentes situations de production du tournesol au nord et au sud de la France.

Les résultats obtenus ont permis d'apporter des réponses à notre problématique de départ. Ils ont montré que les tendances d'évolutions sont différentes entre les trois maladies en fonction des périodes de temps. Les tendances entre les sites sont souvent similaires. Avec comme sans adaptation, les risques de phomopsis et du mildiou diminuent avec le temps futur tandis que celui de sclérotinia du capitule qui est faible reste invariable dans le temps. La diminution des risques de phomopsis et de mildiou semble plus évidente au sud. Les tendances des risques ne sont pas sensibles aux stratégies étudiées.

De ce fait, l'impact des risques sanitaires sur la performance des stratégies n'est pas discriminant. Les résultats de l'évaluation multicritère montrent que les adaptations ne sont pas plus performantes que la référence dans la quasi-majorité des situations. La stratégie d'esquive arrive à avoir des performances similaires à celles de la référence. La stratégie d'irrigation est défavorisée par son fort impact sur l'environnement. La culture dérobée montre son intérêt notamment sur les sols profonds. Les stratégies d'adaptation telles que évaluées dans le présent travail sont peu intéressantes dans un contexte du changement climatique.

Cette étude mérite d'être revue et approfondie, les stratégies d'adaptation restent à décrire avec plus de détails pour permettre leur discrimination. Les modèles de prédiction des risques maladies sont à développer et à améliorer pour mieux représenter les processus biologiques et les interactions des pathosystèmes. Le modèle d'évaluation devrait être complété et validé par des acteurs de la filière pour fournir une évaluation plus robuste des stratégies.

Références bibliographiques

Aćimović M. (1998). Sunflower Diseases. *Institut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad (In Serbian).* In*:* Miladinović D., Hladni N., Radanović A., Jocić S. et Cvejić S. (2019). *Sunflower and Climate Change: Possibilities of Adaptation Through Breeding and Genomic Selection. In: Genomic Designing of Climate-Smart Oilseed Crops. Springer. p. 173-238.*

Agreste. (2013). Les indicateurs de fréquence de traitement (IFT) en 2011. *AGRESTE, Les Dossiers*, vol. 18, p. 5-8. http://www.lafranceagricole.fr/r/Publie/FA/p1/Infographies/Web/2013-11-28/80769_1.pdf

Assemat P., Fayret J. (1987). Differentiation of the perithecia of Diaporthe helianthi, parasite of sunflower, grown in vitro. Effects of some environmental factors. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie 3 Sciences de la Vie (France)*, vol. 305. p. 221-224.

Aubertot J.-N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.-N., Guichard L., Lucas P., Savary S., Voltz M. (2007). *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux.* Montpellier (France) : INRA. 66 p. Expertise scientifique collective Inra-Cemagref (décembre 2005).

Aubertot J.-N., Robin M.-H. (2013). Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, and the abiotic and biotic environment. I. Conceptual bases. *PLoS one*, vol. 8, n. 9, p. 1-12. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073202

Berlese A., De-Toni J. (1888). Phycomycetteae. In: *Sylloge fungorum, VII:242*, In : Mestries E., Desanlis M., Seassau C., Moinard J., Debaeke P. et Dechamp-Guillaume G. (2011). Impact de la conduite de culture sur les maladies du tournesol. Innovations agronomiques, vol. 14, p. 91-108. https://hal.inrae.fr/hal-02642933/document

Bohanec M., Dzeroski S., Znidarsic M., Messéan A., Scatasta S., Wesseler J. (2004). Multi-Attribute Modelling of Economic and Ecological Impacts of Cropping Systems. *Informatica (Slovenia)*, vol. 28, n. 4, p. 387-392. http://www.biw.kuleuven.be/aee/clo/wp/Scatasta2006c.pdf

Bohanec M. et Rajkovič V. (1990). DEX: An expert system shell for decision support. *Sistemica*, vol. 1, n. 1, p. 145-157. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.142.2037&rep=rep1&type=pdf

Bohanec M., Žnidaršič M., Rajkovič V., Bratko I., Zupan B. (2013). DEX methodology: three decades of qualitative multi-attribute modeling. *Informatica*, vol. 37, n. 1, p. 49-54.

Boonekamp P.M. (2012). Are plant diseases too much ignored in the climate change debate? *European Journal of Plant Pathology*, 01/05/2012, vol. 133, n. 1, p. 291-294. https://doi.org/10.1007/s10658-011-9934-8

Bordat A., Debaeke P., Dechamp-Guillaume G., Mestries E., Seassau C., Vincourt P. (2011). *Phoma et dessèchement précoce du tournesol.* Paris (France) : CETIOM. 86 p. (Coll Les Points Techniques du CETIOM)

Bouyssou D., Marchant T., Pirlot M., Tsoukias A., Vincke P. (2006). *Evaluation and decision models with multiple criteria: Stepping stones for the analyst.* Berlin (Allemagne) : Springer Science & Business Media. 445 p

Casadebaig P., Guilioni L., Lecoeur J., Christophe A., Champolivier L., Debaeke P. (2011). SUNFLO, a model to simulate genotype-specific performance of the sunflower crop in contrasting environments. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 151, n. 2, p. 163-178. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.012

Caubel, J., Launay, M., Ripoche, D., Gouache, D., Buis, S., Huard, F., Huber L., Brun F., Bancal, M. O. (2017). Climate change effects on leaf rust of wheat: Implementing a coupled crop-disease model in a French regional application. *European Journal of Agronomy*, vol. 90, p. 53-66. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.004

Cellier V., Berthier A., Colnenne-David C., Darras S., Deytieux V., Savoie A., Aubertot J.-N. (2018). Evaluation multicritère de systèmes de culture zéro-pesticides en grande culture et polyculture-élevage (Réseau Rés0Pest). *Innovations Agronomiques*, vol. 70. p. 273-289. http://doi.org/10.15454/y8fy5s

Craheix D., Bergez J.-E., Angevin F., Bockstaller C., Bohanec M., Colomb B., Doré T., Fortino G., Guichard L., Pelzer E. (2015). Guidelines to design models assessing agricultural sustainability, based upon feedbacks from the DEXi decision support system. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 35, n. 4, p. 1431-1447. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0315-0

Cunniffe N.J., Koskella B., Metcalf C.J.E., Parnell S., Gottwald T.R., Gilligan C.A. (2015). Thirteen challenges in modelling plant diseases. *Epidemics*, vol. 10, p. 6-10. https://doi.org/10.1016/j.epidem.2014.06.002

Davet P. (1991). *Les maladies du tournesol*. Paris (France) : CETIOM. 72 p.

Debaeke P., Bedoussac L., Bonnet C., Bret-Mestries E., Seassau C., Gavaland A., Raffaillac D., Tribouillois H., Véricel G., Justes E. (2017a). Sunflower crop: environmental-friendly and agroecological. *Ocl*, vol. 24, n. 3, p. 1-12. https://doi.org/10.1051/ocl/2017020

Debaeke P., Casadebaig P., Flenet F., Langlade N. (2017b). Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *Ocl*, vol. 24, n. 1, p. 1-15. https://doi.org/10.1051/ocl/2016052

Debaeke P., Chabanis J. (1999). *An integrated simulation model of yield loss by a fungal pathogen: Stem canker (Phomopsis helianthi) in sunflower*. 2 p. International symposium modelling cropping systems, 1999/06/21-23, Lleida (Espagne).

Debaeke P., Estragnat A. (2003). A simple model to interpret the effects of sunflower crop management on the occurrence and severity of a major fungal disease: Phomopsis stem canker. *Field crops research*, vol. 83, n. 2, p. 139-155. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00071-6

Debaeke P., Estragnat A., Reau R. (2003). Influence of crop management on sunflower stem canker (Diaporthe helianthi). *Agronomie, EDP Sciences*, vol. 23, n. 7, p. 581 - 592. https://doi.org/10.1051/agro:2003032

Debaeke P., Mestries E., Desanlis M., Seassau C. (2014). Effects of crop management on the incidence and severity of fungal diseases in sunflower. In : Filippi C. (ed.), Zubrzycki J. (ed.), Lía V. (ed.), Heinz R. A .(ed.), Paniego N. B. (ed.). et Hopp H E. (ed.). *Sunflowers: growth and development, environmental influences and pests/diseases.* Hauppauge (Etats-Unis) : Nova Science Publishers, p. 201-226. https://hal.inrae.fr/hal-02801511/document

Delos M., Eychenne N., Folcher L., Debaeke P., Laporte F. (2004). Les méthodes alternatives pour lutter contre les maladies en grandes cultures: Grandes cultures. *Phytoma, la défense des végétaux*, n. 567, p. 14-18.

Delos M., Moinard J. (1995). Evolution du phomopsis du tournesol en france bref historique. *Phytoma-la defense des vegetaux*, n. 473, p. 22-24.

Délos M., Moinard J. (1996). Asphodel: modele de simulation-des epidemies de phomopsis du tournesol (diaporthe helianthi). *Mededelingen-faculteit landbouwkundige en toegepaste biologische wetenschappen*, vol. 61, p. 555-566.

Desanlis M. (2013). *Analyse et modélisation des effets de la conduite de culture sur deux maladies cryptogamiques majeures du tournesol causées par Phoma macdonaldii et Phomopsis helianthi.* Thèse INP Toulouse, France, 205 p. http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002382/

Desanlis M., Aubertot J.-N., Mestries E., Debaeke P. (2013). Analysis of the influence of a sunflower canopy on Phomopsis helianthi epidemics as a function of cropping practices. *Field Crops Research*, vol. 149, p. 63-75. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.04.016

Deytieux V., Munier-Jolain N., Caneill J. (2016). Assessing the sustainability of cropping systems in single-and multi-site studies. A review of methods. *European journal of agronomy*, vol. 72, p. 107-126. https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.10.005

Donatelli M., Duveiller G., Fumagalli D., Srivastava A., Zucchini A., Angileri V., Fasbender D., Loudjani P., Kay S., Juskevicius V. (2012). *Assessing agriculture vulnerabilities for the design of effective measures for adaption to climate change.* AVEMAC final report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 176 p.

Donnelly A., Caffarra A., O'Neill B.F. (2011). A review of climate-driven mismatches between interdependent phenophases in terrestrial and aquatic ecosystems. *International Journal of Biometeorology*, vol. 55, n. 6, p. 805-817. https://doi.org/10.1007/s00484-011-0426-5

Doumpos M., Zopounidis C. (2002). On the use of a multi-criteria hierarchical discrimination approach for country risk assessment. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 11, n. 4-5, p. 279-289. https://doi.org/10.1002/mcda.335

F.A.O. (2017). *The future of food and agriculture - Trends and challenges.* Rome (Italie) : Food and Agriculture Organization of the United Nations. 151 p.

Flood J. (2010). The importance of plant health to food security. *Food Security*, vol. 2, n. 3, p. 215-231. https://doi.org/10.1007/s12571-010-0072-5

Gulya T., Rashid K.Y., Masirevic S.M. (1997). Sunflower diseases. *Sunflower technology and production*, vol. 35, p. 263-379. https://doi.org/10.2134/agronmonogr35.c6

Harveson R. (2011). Downy mildew of sunflower in Nebraska. *NebGuide*, G2075, 4 p. https://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/g2075.pdf

Howden S.M., Soussana J.-F., Tubiello F.N., Chhetri N., Dunlop M., Meinke H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the national academy of sciences*, vol. 104, n. 50, p. 19691-19696. https://doi.org/10.1073/pnas.0701890104

I.N.A-P-G D.-A. (2003). *Le tournsol*. Paris : INA P-G – Département AGER. 21 p.

Jouffret P., Labalette F., Thibierge J., George V. (2011). Atouts et besoins en innovations du tournesol pour une agriculture durable. *Innovations agronomiques*, vol. 14, p. 1-17. https://hal.inrae.fr/hal-02642522/document

Juroszek P., 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*, vol. 122, n. 1, p. 3-15. https://doi.org/10.1007/BF03356525

Kaya Y., Jocic S., Miladinovic D. (2012). Sunflower. In: Gupta S. (eds) *Technological Innovations in Major World Oil Crops.* New York (USA) : Springer. p. 85-129. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0356-2

Kim K.-H., Cho J. (2016). Predicting potential epidemics of rice diseases in Korea using multi-model ensembles for assessment of climate change impacts with uncertainty information. *Climatic change*, vol. 134, n. 1-2, p. 327-339. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1503-2

Launay M. (2019). *Modélisation du fonctionnement des agrosystèmes et des pathosystèmes dans un contexte de changement climatique*. Thèse HDR. École doctorale 410 Sciences et Ingénierie des Ressources Naturelles (SIReNa), nancy (France). 112 p. https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02427243/document

Launay M., Caubel J., Bourgeois G., Huard F., de Cortazar-Atauri I.G., Bancal M.-O., Brisson N. (2014). Climatic indicators for crop infection risk: application to climate change impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. *Agriculture, ecosystems & environment*, vol. 197, p. 147-158. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.020

Launay M., Zurfluh O., Huard F., Buis S., Bourgeois G., Caubel J., Huber L., Bancal M.-O. (2020). Robustness of crop disease response to climate change signal under modeling uncertainties. *Agricultural Systems*, vol. 178, p. 1-14. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102733

Lecomte V., Nolot J.M. (2011). Place du tournesol dans le système de culture. *Innovations agronomiques*, vol. 14, p. 59-76. https://hal.inrae.fr/hal-02643801/document

Markell S.G., Harveson R.M., Block C.C., Gulya T.J. (2015). Sunflower diseases. In: Martinez-Force E., Dunford N.T, Salas. J.J. *Sunflower*. Urbana, Illinois : AOCS Press. p. 93-128. https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-94-3.50010-6

Maširević S. (2016). Sunflower diseases research progress and management. *ISC 2016*, p. 60.

Masirevic S., Gulya T. (1992). Sclerotinia and Phomopsis—two devastating sunflower pathogens. *Field crops research*, vol. 30, n. 3-4, p. 271-300. https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90004-S

Mehrabi Z., Pironon S., Kantar M., Ramankutty N., Rieseberg L. (2019). Shifts in the abiotic and biotic environment of cultivated sunflower under future climate change. *Ocl*, vol. 26, p. 9. https://doi.org/10.1051/ocl/2019003

Mestries E., Desanlis M., Seassau C., Moinard J., Debaeke P., Dechamp-Guillaume G. (2011). Impact de la conduite de culture sur les maladies du tournesol. *Innovations agronomiques*, vol. 14, p. 91-108. https://hal.inrae.fr/hal-02642933/document

Mihaljčević M., Muntañola-Cvetković M., Vukojević J., Petrov M. (1985). Source of infection of sunflower plants by Diaporthe helianthi in Yugoslavia. *Journal of Phytopathology*, vol. 113, n. 4, p. 334-342. https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1985.tb04834.x

Miladinović D., Hladni N., Radanović A., Jocić S., Cvejić S. (2019). Sunflower and climate change: possibilities of adaptation through breeding and genomic selection. In: Kole C. *Genomic Designing of Climate-Smart Oilseed Crops*. Springer International Publishing. p. 173-238. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93536-2_4

Muntanola-Cvetkovic M., Mihaljcevic M., Petrov M. (1981). On the identity of the causative agent of a serious Phomopsis-Diaporthe disease in sunflower plants. *Nova Hedwigia*, vol. 34, n. 3/4, p. 417-435.

Ness B., Urbel-Piirsalu E., Anderberg S., Olsson L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological economics*, vol. 60, n. 3, p. 498-508. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.023

Newbery F., Qi A., Fitt B.D. (2016). Modelling impacts of climate change on arable crop diseases: progress, challenges and applications. *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 32, p. 101-109. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.07.002

Oerke E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, vol. 144, n. 1, p. 31-43. https://doi.org/10.1017/S0021859605005708

Orlandini S., Magarey R.D., Park E.W., Sporleder M., Kroschel J. (2017). Methods of agroclimatology: Modeling approaches for pests and diseases. *Agroclimatology: Linking Agriculture to Climate*, vol. 60, p. 453-488. https://doi.org/10.2134/agronmonogr60.2016.0027

Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R., Jouzel J. (2014). *Le climat de la France au XXIe siècle*. Paris : Direction générale de l'énergie et du climat. 64 p. https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-22612-onerc-climat-france.pdf

Pareek A., Dhankher O.P., Foyer C.H. (2020). Mitigating the impact of climate change on plant productivity and ecosystem sustainability. *Journal of Experimental Botany*, vol. 71, n. 2. 451–456 p. https://doi.org/10.1093/jxb/erz518

Parry M., Parry M.L., Canziani O., Palutikof J., Van der Linden P., Hanson C. (2007). *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press. (vol. 4). 16 p;

Pastor A., Palazzo A., Havlik P., Biemans H., Wada Y., Obersteiner M., Kabat P., Ludwig F. (2019). The global nexus of food–trade–water sustaining environmental flows by 2050. *Nature Sustainability*, vol. 2, n. 6, p. 499-507. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0287-1

Pelzer E., Fortino G., Bockstaller C., Angevin F., Lamine C., Moonen C., Vasileiadis V., Guérin D., Guichard L., Reau R. (2012). Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological indicators*, vol. 18, p. 171-182. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.019

Pinochet X. (1995). Phomopsis et évaluation variétale de la sensibilité. *Oléoscope NSpécial*, vol. 14, p. 27-36.

Robin M.-H. (2013). *Analyse et modélisation des effets des pratiques culturales et de la situation de production sur les dégâts causés par les bioagresseurs des cultures. Application au blé d'hiver*. Thèse PhD : Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse (France). 317 p. https://oatao.univ-toulouse.fr/11772/1/Robin.pdf

Sadok W., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Doré T. (2008). Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 28, n. 1, p. 163-174. https://doi.org/10.1051/agro:2007043

Sadok W., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Messéan A., Doré T. (2009). MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 29, n. 3, p. 447-461. https://doi.org/10.1051/agro/2009006

Savary S., Nelson A., Willocquet L., Pangga I., Aunario J. (2012). Modeling and mapping potential epidemics of rice diseases globally. *Crop Protection*, vol. 34, p. 6-17. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.11.009

Sebillotte M. (1990). Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In : Magali B. et J-R Moronval. *Les systèmes de culture*. Paris : Educagri. p. 165-196.

Seiler G.J., Qi L.L., Marek L.F. (2017). Utilization of sunflower crop wild relatives for cultivated sunflower improvement. *Crop Science*, vol. 57, n. 3, p. 1083-1101. https://doi.org/10.2135/cropsci2016.10.0856

Skelsey P., Cooke D.E., Lynott J.S., Lees A.K. (2016). Crop connectivity under climate change: future environmental and geographic risks of potato late blight in Scotland. *Global change biology*, vol. 22, n. 11, p. 3724-3738. https://doi.org/10.1111/gcb.13368

Skelsey P., Newton A.C. (2015). Future environmental and geographic risks of Fusarium head blight of wheat in Scotland. *European Journal of Plant Pathology*, vol. 142, n. 1, p. 133-147. https://doi.org/10.1007/s10658-015-0598-7

Tonin P. (2018). Les productions françaises d'oléagineux de spécialité: des démarches en filière pour créer de la valeur dans nos territoires. *Ocl*, vol. 25, n. 2, p. 451–456.

U.S.D.A. (2020). *Oilseeds: Oil Markets And Trade*. Washington : USDA. 38 p. https://www.fas.usda.gov/data/oilseeds-world-markets-and-trade

Vasileiadis V., Moonen A., Sattin M., Otto S., Pons X., Kudsk P., Veres A., Dorner Z., Van der Weide R., Marraccini E. (2013). Sustainability of European maize-based cropping systems: Economic, environmental and social assessment of current and proposed innovative IPM-based systems. *European journal of agronomy*, vol. 48, p. 1-11.

https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.02.001

Vedy-Zecchini M.-A., Quesnel G., Mestries E., Robin M.-H. et Aubertot J.-N. (2018). *SimMat Diaporthe: un modèle pour prédire la dynamique de maturation des périthèces de Diaporthe helianthi. 15 p.* 12. Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, 2018/12/11-12, Tours (France). https://hal.inrae.fr/hal-02791441/document

Virányi F. (2008). *Research progress in sunflower diseases and their management.* 8-12 p. 17. International Sunflower Conference, 2008/06/8-12, Cordoba (Spain)

Walcz I., Nébli L. (2006). *Contribution to the knowledge of resistance of sunflower to Diaporthe (Phomopsis) helianthi.* 94 p. 52nd National Plant Protection Conference, Budapest (Hongrie).

West J.S., Townsend J.A., Stevens M., Fitt B.D. (2012). Comparative biology of different plant pathogens to estimate effects of climate change on crop diseases in Europe. *European Journal of Plant Pathology*, vol. 133, n. 1, p. 315-331. https://doi.org/10.1007/s10658-011-9932-x

Zayan S.A. (2019). Impact of Climate Change on Plant Diseases and IPM Strategies. In : Topolovec-Pintarić S. *Plant Diseases - Current Threats and Management Trends*. Rijeka (Croatie) : IntechOpen. p. 1-12. https://doi.org/10.5772/intechopen.87055

Webographie

Aagro.basf.fr [consulté en avril 2020] : https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/tournesol/maladies_du_tournesol/

Terre univia [consulté en avril 2020] : http://www.terresunivia.fr/cultures-utilisation/les-especes-cultivees/tournesol

Agreste. (2020). *Statistiques sur les surfaces, productions et rendements en céréales et oléoprotéagineux.* [consulté en mai 2020] https://visionet.franceagrimer.fr/Pages/Statistiques.aspx?menuurl=Statistiques/productions%20v%C3%A9g%C3%A9tales/grandes%20cultures/surfaces,productions,rendements

Annexes

Annexe 1. Description du modèle de prédiction de risque de phomopsis construit sur la plateforme X_Pest

Modèle de risque de Phomopsis

modèle pour prédire les risques de pollution, d'infection et de passage feuilles-tige post_infection de Phomopsis

Modèles

Nom	Description
modele_post_infection	Indicateur pour détecter les conditions post infection favorables au passage Phomopsis feuilles-tige: - Si Nb de jours avec Tmax>32°C >=4 entre F1 et M3 (Maturité physio) ET Somme P<70 mm entre F1 et M3 : risque faible (conditions bloquantes) - Si Nb de jours avec Tmax>32°C >=4 entre F1 et M3 OU Somme P<70 mm entre F1 et M3 : risque moyen (conditions peu favorables) - Si Nb de jours avec Tmax>32°C < 4 entre F1 et M3 ET Somme P >= 70 mm entre F1 et M3 : risque fort (conditions favorables)
modele_infection	modèle pour prédire le risque d'infection post-pollution de phomopsis entre les phases E1 (bouton étoilé) et F1 (floraison)
modele_pollution	modèle pour prédire le risque de de pollution Phomopsis
SimMat_Diaporthe	modèle de prédiction de maturation de périthèces de phomopsis (Diaporthe helianthi)

Paramètre

Nom	Unité	Description	Valeur du paramètre	Modélisation
tmaxpi	°C	Seuil de température défavorable au passage feuilles-tige post infection	32.0	Indicateur_post_infection
M3	°C.day	Temps thermique correspondant à M3 (maturité physiologique)	1801.0	Indicateur_post_infection
F1	°C.day	Temps thermique correspondant à F1	934.0	Indicateur_post_infection
rrpim	mm	Cumul minimal de précipitations entre F1 et M3 pour provoquer un passage feuilles-tige post-infection	70.0	Indicateur_post_infection
Jtmax	day	Nombre de jours avec Tmax > 32°C » >=4 (défavorables au passage feuilles-tige post-infection)	4.0	Indicateur_post_infection
Julf	day	dernier jour de l'année qui correspond au 31 ou 30 décembre selon l'année ordinaire ou bissextile (ça ne pose pas de problème	365.0	Indicateur_post_infection
rrmm	mm	Seuil minimum nécessaire de précipitations pour provoquer une infection au jour considéré	10.0	modele_infection
rrpm	mm	Seuil minimum journalier de précipitations pendant deux jours successifs pour provoquer une infection	5.0	modele_infection
Nj	day	Nombre de jours de survie de périthèces après leur maturation	9.0	modele_infection
Julf	day	Dernier jour de l'année qui correspond au 31 ou 30 décembre selon l'année ordinaire ou bissextile (ça ne pose pas de problème car le tournesol n'est plus là au mois de décembre)	365.0	modele_infection
F1	°C.day	Temps thermique correspondant à F1 (fin de la phase de sensibilité du tournesol)	934.0	modele_infection
E1	°C.day	Temps thermique correspondant au début de la phase E1 (début de la phase de sensibilité du tournesol)	582.0	modele_infection
Sem	day	Jour julien correspondant à la date de semis selon l'ITK	110.0	modele_pollution

Julf	day	dernier jour de l'année qui correspond au 31 ou 30 décembre selon l'année ordinaire ou bissextile (ça ne pose pas de problème car le tournesol n'est plus là au mois de décembre)	365.0	modele_pollution
rrmin	mm	Seuil minimum de précipitations pour déclencher un événement de pollution	0.5	modele_pollution
F1	°C.day	Temps thermique correspondant à F1 (fin de la phase de sensibilité du tournesol)	934.0	modele_pollution
E1	°C.day	Temps thermique correspondant au début de la phase E1 (début de la phase de sensibilité du tournesol)	582.0	modele_pollution
PMPmin	Dimensionless	Proportion minimale cumulée de périthèces matures pour provoquer la pollution	0.5	modele_pollution
Tbase	°C	Température de base ou zéro de végétation: température en dessous de laquelle la croissance et le développement de la plante s'arrêtent.	4.8	modele_pollution
Dt	day	Intervalle de temps pour le calcul des temps thermiques	1.0	modele_pollution
Juld	day	Jour julien correspondant à la date théorique de début de sporulation	32.0	SimMat_Diaporthe
Pi	Dimensionless	Valeur du nombre Pi	3.14159265359	SimMat_Diaporthe
sFD	day	Écart type des jours favorables à la maturation	15.0	SimMat_Diaporthe
TX	°C	Seuil de température journalière maximale permettant la maturation des périthèces	30.0	SimMat_Diaporthe
TN	°C	Seuil de température journalière minimale permettant la maturation des périthèces	10.3	SimMat_Diaporthe
RN	mm	Seuil minimal de précipitations permettant la maturation des périthèces	4.0	SimMat_Diaporthe
k	mm-1	Paramètre lié à la proportion de périthèces matures qui libéreront leurs ascospores en fonction des précipitations quotidiennes	0.008	SimMat_Diaporthe
NFD	day	Nombre prévu de jours favorables à la maturation	30.0	SimMat_Diaporthe
Nd	day	Nombre de jours pour cumuler les précipitations	4.0	SimMat_Diaporthe

Paramètre

Nom	Unité	Description	Fichier	Temps	Modélisation
Jul	day	Jour julien	1986.CSV	i	SimMat_Diaporthe
rr	mm	pluviométrie journalière	1986.CSV	i	SimMat_Diaporthe
rrcm	mm	pluviométrie cumulée sur Nd jours (4 jours) (les 3 derniers jours + le jour présent).	1986.CSV	i	SimMat_Diaporthe
tmax	°C	température journalière maximale	1986.CSV	i	SimMat_Diaporthe
tmin	°C	température journalière minimale	1986.CSV	i	SimMat_Diaporthe

Variables Climatiques(Fichier Climat. :)

Nom	Unité	Description	Nom de la colonne

Nom	Unité	Description	Expression	Modélisation
appr_risque	Dimensionless	Appréciation du risque risque passage feuilles-tige post infection entre F1 et M3: 1 : risque faible 2 : risque moyen 3 : risque fort	((Jul==Julf)&&(Sum_Jt>=Jtmax)&&(Sum_rr_pi<rrpim))?(1):(((Jul==Julf)&&((Sum_Jt>=Jtmax)||(Sum_rr_pi<rrpim)))?(2):(((Jul==Julf)?(3):(0))))	Indicateur_post_infection
Cumul_Jt	day	cumul de jours avec T max > 32 °C	Cumul_Jt(-1)+Jt	Indicateur_post_infection
Cumul_rr_pi	mm	Cumul de pluie journalière post infection	Cumul_rr_pi(-1)+rr_pi	Indicateur_post_infection
Jt	day	variable binaire pour indique si : un jour post infection avec température (tmax > 32 °C) = 1 ; sinon = 0	((STEMP>=F1)&&(STEMP<=M3)&&(Jul<=303)&&(tmax>tmaxpi)?(1):(0))	Indicateur_post_infection
rr_pi	mm	pluviométrie journalière entre F1 et M3	((STEMP>=F1)&&(STEMP<=M3)&&(Jul<=303)?(rr):(0))	Indicateur_post_infection
Sum_Jt	day	Cumul de jours post infection (entre F1 et M3) avec tmaxpi à la fin d'année	((Jul==Julf)?(Cumul_Jt):(0))	Indicateur_post_infection
Sum_rr_pi	mm	Cumul de précipitations pendant la période de sensibilité de post infection	((Jul==Julf)?(Cumul_rr_pi):(0))	Indicateur_post_infection
Cumul_infection	day	cumul de jours (événements) favorables à l'infection	Cumul_infection(-1)+Infection	modele_infection
Infection	Dimensionless	Variable binaire indiquant si une infection a eu lieu ou non au jour considéré (infection = 0 >> jour sans infection ; infection = 1 >> jour avec infection). Pour qu'il y ait infection, il faut que : - sur une fenêtre de Nj jours précédents la journée considérée, on y ait au moins un événement de pollution suivi d'au moins une journée avec plus de 15 mm ou 2 jours successifs avec plus 5 mm de pluie chacun.	((PluieFav-Comptpoll<=Nj)&&(STEMP>=E1)&&(PluieFav!=0)&&((PluieFav-Ppoll)<=Nj)?(1):(0))	modele_infection
PluieFav	Dimensionless	Jour de pluie favorable à l'infection: Jour où il y a plus 10 mm de pluie Ou Jour où il y a plus de 5 mm et plus de 5 mm le jour précédent	(((rrp>rrpm)&&(rr>rrpm))||(rr>rrmm))?(Jul):(0)	modele_infection
Ppoll	Dimensionless	Variable intermédiaire pour indiquer la fin de possibilité d'infection, soit 9 jours après le début de la phase F1.	((STEMP<=F1)&&(STEMP>=E1))?(Jul):(Ppoll(-1))	modele_infection
Sum_infection	day	Cumul de jours (événements) d'infection à la fin d'année	((Jul==Julf)?(Cumul_infection):(0))	modele_infection
Comptpoll	Dimensionless	compteur de pollution	((Pollution==1)?(Jul):(Comptpoll(-1)))	modele_pollution
Cumul_pollution	jour	cumul de jours (événements) favorables à la pollution	Cumul_pollution(-1)+Pollution	modele_pollution
DTEMP	°C.day	Accroissement journalier du temps thermique	max(0 , (tmean-Tbase))*Dt	modele_pollution

Pollution	Dimensionless	Evénements de pollution entre le stade E1 et F1: Variable binaire : si le jour est favorable à un événement de pollution = 1 , sinon = 0	((PMP>=PMPmin)&&(STEMP>=E1)&&(STEMP<=F1)&&((rr)>=rrmin))?(1):(0)	modele_pollution
STEMP	°C.day	Temps thermique cumulé depuis le semis	((Jul>Sem)?(STEMP(-1)+DTEMP(-1)):(0))	modele_pollution
Sum_pollution	day	Cumul de jours (événements) de pollution à la fin d'année	((Jul==Julf)?(Cumul_pollution):(0))	modele_pollution
CDFM	day	Cumul journalier des jours favorables à la maturation des périthèces: Jour favorable = 1 s'il remplit les conditions de maturation décrites dans l'équation. Jour défavorable = 0 s'il ne remplit pas les conditions de maturation.	CDFM(-1)+(((Jul>=Juld)&&(rrcm>=RN)&&(tmean>=TN)&&(tmean<=TX))?(1):(0))	SimMat_Diaporthe
CDFMv	Dimensionless	Valeur de CDFM du jour précendent	CDFM(-1)	SimMat_Diaporthe
F	Dimensionless	Calcul de l'intégrale de CDFM de 0 à + l'infini avec la méthode des trapèzes.	(CDFM-CDFMv)*(exp(-(CDFMv-NFD)^2/2/sFD/sFD)+exp(-(CDFM-NFD)^2/2/sFD/sFD))/2/sFD /sqrt(2*Pi)	SimMat_Diaporthe
PMP	Dimensionless	Proportion cumulée de périthèces matures au jour d =PMP jour précédent + PMP du jour d.	PMP(-1)+F	SimMat_Diaporthe
REP	Dimensionless	Proportion cumulée de périthèces ayant largué leurs ascospores	REP(-1)+(PMP-REP(-1))*(1-exp(-k*rr))	SimMat_Diaporthe
RMFP	Dimensionless	Taux de périthèces prêts à larguer leurs ascospores	RMFP(-1)+((PMP-REP)/(1-REP))	SimMat_Diaporthe
rrp	mm	Pluie de jour précédent	rr(-1)	SimMat_Diaporthe
rrp2	mm	pluviométrie de jour n-2	rrp(-1)	SimMat_Diaporthe
tmean	°C	Température moyenne journalière	(tmax+tmin)/2	SimMat_Diaporthe
tmeanp	°C	température moyenne de jour précédent	tmean(-1)	SimMat_Diaporthe
tmeanp2	°C	Température moyenne de jour n-2	tmeanp(-1)	SimMat_Diaporthe

Annexe 2. Description du modèle de prédiction de risque d'infection par le mildiou construit sur la plateforme X_Pest

Modele_prediction_risque_infection_mildiou

modèlle pour prédire le risque d'infection par le mildiou

Modèles

Nom	Description
Risque_infection_Mildiou	Modèle de prédiction de risque infection mildiou en fonction des conditions climatiques favorables définies comme suit: Somme Pj >= 50 mm entre JS-5 et JS+5 ET T max air >= 10 °C entre JS-5 et JS+5

Paramètre

Nom	Unité	Description	Valeur du paramètre	Modélisation
Juld	day	Jour julien correspondant à la date théorique de début de sporulation	32.0	SimMat_Diaporthe
tmaxsem	°C	Température maximale journalière favorable à l'infection du mildiou	10.0	Risque_infection_Mildiou
Jtsem	day	Nombre de jour avec Jtmaxsem nécessaires à déclencher une infection mildiou	10.0	Risque_infection_Mildiou
Julf	day	Jour fin d'année	365.0	Risque_infection_Mildiou
rrsem_min	mm	1 er seuil de cumul de précipitations autour semis pour provoquer une infection mildiou	30.0	Risque_infection_Mildiou
rrsem_max	mm	2 ème seuil de cumul de précipitations autour semis pour provoquer une infection mildiou	50.0	Risque_infection_Mildiou
Sem	day	Jour julien correspondant à la date de semis selon l'ITK	110.0	Risque_infection_Mildiou

Paramètre

Nom	Unité	Description	Fichier	Temps	Modélisation
Jul	day	Jour julien	1986.CSV	i	Risque_infection_Mildiou
rr	mm	pluviométrie journalière	1986.CSV	i	Risque_infection_Mildiou
tmax	°C	température journalière maximale	1986.CSV	i	Risque_infection_Mildiou

Variables Climatiques(Fichier Climat. :)

Nom	Unité	Description	Nom de la colonne

Variables

Nom	Unité	Description	Expression	Modélisation
apprec_risque	Dimensionless	Appréciation risque mildiou autour de semis : 1 : risque faible 2 : risque moyen 3 : risque fort	((Jul==Julf)&&(Sum_Jts>=Jtsem)&&(Sum_rr_sem>rrsem_max))?(3):(((Jul==Julf)&&((Sum_Jts>=Jtsem)&&(Sum_rr_sem>rrsem_min)&&(Sum_rr_sem<rrsem_max)))?(2):(((Jul==Julf)?(1):(0))))	Risque_infection_Mildiou

Cumul_Jts	day	Cumul de jour autour semis avec tmax>=10 °C	Cumul_Jts(-1)+Jts	Risque_infection_Mildiou
Cumul_rr_sem	mm	Cumul de pluviométrie autour de semis	Cumul_rr_sem(-1)+rr_sem	Risque_infection_Mildiou
Jts	day	variable binaire pour indique si : un jour autour de semis avec température (tmax > 10 °C) = 1 ; sinon = 0	(((Jul>Sem-5)&&(Jul<=Sem+5)&&(tmax>=tmaxsem))?(1):(0))	Risque_infection_Mildiou
rr_sem	mm	Pluie journalière autour de semis	(((Jul>=(Sem-5))&&(Jul<=(Sem+5)))?(rr):(0))	Risque_infection_Mildiou
Sum_Jts	day	somme de jour autour semis avec tmaxsem	((Jul==Julf)?(Cumul_Jts):(0))	Risque_infection_Mildiou
Sum_rr_sem	mm	Somme de pluviométrie autour de semis à la fin d'année	((Jul==Julf)?(Cumul_rr_sem):(0))	Risque_infection_Mildiou

Annexe 3. Description du modèle de prédiction de risque d'infection par le sclérotinia du capitule construit sur la plateforme X_Pest

Modèle de prédiction de risque infection sclerotinia_capitule

modèle de pédiction de risque d'infection par le sclerotinia du capitule

Modèles

Nom	Description
Risque_infection_Sclerotinia	Indicateur de risque d'infection par sclérotinia capitule chez le tournesol

Paramètre

Nom	Unité	Description	Valeur du paramètre	Modélisation
Dt	day	Intervalle de temps pour le calcul des temps thermiques	1.0	Risque_infection_Sclerotinia
Tbase	°C	Température de base ou zéro de végétation: température en dessous de laquelle la croissance et le développement de la plante s'arrêtent.	4.8	Risque_infection_Sclerotinia
Julf	day	dernier jour de l'année qui correspond au 31 ou 30 décembre selon l'année ordinaire ou bissextile (ça ne pose pas de problème car le tournesol n'est plus là au mois de décembre)	365.0	Risque_infection_Sclerotinia
Sem	day	Jour julien correspondant à la date de semis selon l'ITK	110.0	Risque_infection_Sclerotinia
tmeanF1	°C	Température moyenne journalière au delà de laquelle l'infection sclérotinia capitule ne peut pas avoir lieu	25.0	Risque_infection_Sclerotinia
F1	°C.day	Temps thermique correspondant au stade début floraison	934.0	Risque_infection_Sclerotinia
F200	°C.day	Temps thermique correspondant au stade fin sensibilité de tournesol au sclérotinia capitule	1134.0	Risque_infection_Sclerotinia
rr_seuil	mm	seuil de pluviométrie journalière minimale nécessaire à l'infection sclérotinia	5.0	Risque_infection_Sclerotinia
Julf	day	dernier jour de l'année qui correspond au 31 ou 30 décembre selon l'année ordinaire ou bissextile (ça ne pose pas de problème car le tournesol n'est plus là au mois de décembre)	365.0	Risque_infection_Sclerotinia

Variables

Nom	Unité	Description	Expression	Modélisation
rrp	mm	Pluie de jour précédent	rr(-1)	Risque_infection_Sclerotinia
rrp2	mm	pluviométrie de jour n-2	rrp(-1)	Risque_infection_Sclerotinia
tmean	°C	Température moyenne journalière	(tmax+tmin)/2	Risque_infection_Sclerotinia
tmeanp	°C	température moyenne de jour précédent	tmean(-1)	Risque_infection_Sclerotinia
tmeanp2	°C	Température moyenne de jour n-2	tmeanp(-1)	Risque_infection_Sclerotinia
DTEMP	°C.day	Accroissement journalier du temps thermique	max(0 , (tmean-Tbase))*Dt	Risque_infection_Sclerotinia
STEMP	°C.day	Temps thermique cumulé depuis le semis	((Jul>Sem)?(STEMP(-1)+DTEMP(-1)):(0))	Risque_infection_Sclerotinia
apr_risk_sclero	Dimensionless	Appréciation de risque infection sclérotinia capitule : 2 : risque fort 1 : risque moyen 0 : pas de risque	(((STEMP>=F1)&&(STEMP<=F200)&&(tmeancon==1)&&(rr_cond==2))?(2):((((STEMP>=F1)&&(STEMP<=F200)&&(tmeancon==1)&&(rr_cond==1))?(1):(0))))	Risque_infection_Sclerotinia
cumul_hr	Dimensionless	cumul de jours avec risque fort infection sclérotinia	cumul_hr(-1)+high_risk	Risque_infection_Sclerotinia
cumul_mr	Dimensionless	cumul de jours avec risque moyen infection sclérotinia	cumul_mr(-1)+medium_risk	Risque_infection_Sclerotinia
high_risk	Dimensionless	variable binaire pour indiquer les jours avec risque fort si risque fort : 1 si non : 0	((apr_risk_sclero==2)?(1):(0))	Risque_infection_Sclerotinia
medium_risk	Dimensionless	variable binaire pour indiquer les jours avec un risque moyen infection sclérotinia si risque moyen : 1 sinon : 0	((apr_risk_sclero==1)?(1):(0))	Risque_infection_Sclerotinia
rr_cond	Dimensionless	condition de pluviométrie journalière supérieure à 20 : Si - Pj>=20 mm pendant 3 jours successifs : 2 - Pj>=20 mm pendant 2 jours successifs : 1 si non : 0	(((rrp2>=rr_seuil)&&(rrp>=rr_seuil)&&(rr>=rr_seuil))?(2):((((rrp>=rr_seuil)&&(rr>=rr_seuil))?(1):(0))))	Risque_infection_Sclerotinia
Sum_hr	day	Nombre de jours avec fort risque infection sclérotinia à la fin d'année	((Jul==Julf)?(cumul_hr):(0))	Risque_infection_Sclerotinia
Sum_mr	day	Nombre de jour avec risque moyen infection sclérotinia à la fin d'année	((Jul==Julf)?(cumul_mr):(0))	Risque_infection_Sclerotinia
tmeancon	°C	Condition de température =< 25 °C pendant 3 jours nécessaires pour un infection sclérotinia capitule	(((tmean<=tmeanF1)&&(tmeanp<=tmeanF1)&&(tmeanp2<=tmeanF1))?(1):(0))	Risque_infection_Sclerotinia

Annexe 4. Fonctions d'utilité et tables de règles de décision du modèle de l'évaluation multicritère

DEXi Performance stratégie d'adaptation_tournesol.dxi 24/08/2020 Page 1

Functions

Attribute	Rules	Defined	Determined	Values
Performance stratégies d'adaptation_tournesol	2/36	5,56%	100,00%	faible:3,faible à moyenne:15,moyenne:1
Production	2/18	11,11%	100,00%	faible:3,moyenne:12,forte:3
Rentabilité				
Rendement accessible				
Richesse en huile				
Risque sanitaire	3/27	11,11%	100,00%	fort:4,moyen:16,faible:7
Risque phomopsis				
Risque infection_Mildiou				
Risque infection_Sclérotinia				
Impact sur l'environnement	2/9	22,22%	100,00%	fort:1,faible à moyen:3,moyen:4,faible:1
Pression sur les ressources	3/6	50,00%	100,00%	forte:1,moyenne:2,faible:3
Consommation en eau				
Consommation en énergie				
Dépendance aux intrants	2/4	50,00%	100,00%	forte:1,moyenne:2,faible:1
Consommation d'engrais azoté				
Consommation en produits phytosanitaires				

Tables

	Production	Risque sanitaire	Impact sur l'environnement	Performance stratégies d'adaptation_tournesol
	37%	31%	32%	
1	faible	fort	<=faible à moyen	faible
2	faible	<=moyen	fort	faible
3	faible	fort	>=moyen	faible à moyenne
4	faible	<=moyen	moyen	faible à moyenne
5	<=moyenne	fort	moyen	faible à moyenne
6	faible	moyen	faible à moyen:moyen	faible à moyenne
7	faible	>=moyen	faible à moyen	faible à moyenne
8	<=moyenne	moyen	faible à moyen	faible à moyenne
9	faible	faible	<=faible à moyen	faible à moyenne
10	<=moyenne	faible	fort	faible à moyenne
11	moyenne	fort	<=moyen	faible à moyenne
12	moyenne	<=moyen	<=faible à moyen	faible à moyenne
13	moyenne	*	fort	faible à moyenne
14	>=moyenne	fort	<=faible à moyen	faible à moyenne
15	>=moyenne	<=moyen	fort	faible à moyenne
16	<=moyenne	>=moyen	faible	moyenne
17	<=moyenne	faible	>=moyen	moyenne
18	moyenne	*	faible	moyenne
19	>=moyenne	fort	faible	moyenne
20	moyenne	>=moyen	>=moyen	moyenne
21	>=moyenne	moyen	moyen	moyenne
22	moyenne	faible	>=faible à moyen	moyenne
23	>=moyenne	faible	faible à moyen	moyenne
24	forte	fort	>=moyen	moyenne
25	forte	<=moyen	moyen	moyenne
26	forte	moyen	faible à moyen:moyen	moyenne
27	forte	>=moyen	faible à moyen	moyenne
28	forte	faible	<=faible à moyen	moyenne
29	forte	>=moyen	faible	forte
30	forte	faible	>=moyen	forte

	Rentabilité	Rendement accessible	Richesse en huile	Production
	47%	32%	21%	
1	faible	faible	*	faible
2	faible	<=moyen	mauvaise	faible
3	<=moyenne	>=moyen	bonne	moyenne
4	<=moyenne	fort	*	moyenne
5	moyenne	*	*	moyenne
6	>=moyenne	faible	*	moyenne
7	>=moyenne	<=moyen	mauvaise	moyenne
8	forte	>=moyen	bonne	forte
9	forte	fort	*	forte

	Risque phomopsis	Risque infection_Mildiou	Risque infection_Sclérotinia	Risque sanitaire
	29%	43%	29%	
1	fort	fort	<=moyen	fort
2	fort	<=moyen	fort	fort
3	<=moyen	fort	fort	fort
4	<=moyen	<=moyen	faible	moyen
5	*	fort	faible	moyen
6	fort	>=moyen	moyen	moyen
7	<=moyen	moyen	>=moyen	moyen
8	*	moyen	moyen	moyen
9	fort	faible	<=moyen	moyen
10	<=moyen	faible	fort	moyen
11	moyen	<=moyen	>=moyen	moyen
12	>=moyen	fort	>=moyen	moyen
13	>=moyen	<=moyen	moyen	moyen
14	moyen	moyen	*	moyen
15	moyen	>=moyen	fort	moyen
16	>=moyen	moyen	<=moyen	moyen
17	faible	fort	*	moyen
18	faible	<=moyen	<=moyen	moyen
19	*	faible	faible	faible
20	>=moyen	faible	>=moyen	faible
21	faible	>=moyen	faible	faible
22	faible	faible	*	faible

	Pression sur les ressources	Dépendance aux intrants	Impact sur l'environnement
	62%	38%	
1	forte	forte	fort
2	forte	>=moyenne	faible à moyen
3	moyenne	forte	faible à moyen
4	moyenne	>=moyenne	moyen
5	>=moyenne	moyenne	moyen
6	faible	<=moyenne	moyen
7	faible	faible	faible

	Consommation en eau	Consommation en énergie	Pression sur les ressources
	53%	47%	
1	forte	élevée	forte
2	forte	modérée	moyenne
3	moyenne	élevée	moyenne
4	>=moyenne	modérée	faible
5	faible	*	faible

	Consommation d'engrais azoté	Consommation en produits phytosanitaires	Dépendance aux intrants
	50%	50%	
1	élevée	traitement	forte
2	élevée	pas de traitement	moyenne
3	modérée	traitement	moyenne

Printed by BoltPDF (c) NCH Software. Free for non-commercial use only.

Annexe 5. Coûts unitaires des intrants et prix de vente utilisés pour les calculs économiques. Données en provenance de Terres Inovia

charge opérationnnelles			
Poste		Unité de p.c. (100 000 gr., kg ou l/ha, passage)	Prix indicatif moyen d'achat à l'unité de p.c. (€)
Semences		100 000 graines	142
Engrais	Bore	l/ha (150g B/ha)	4
	Azote	U	0.9
	Phosphore	U	1
	Potassium	U	1.4
PPP	Phomopsis	l/ha	95
	Herbicide	l/ha	25
	Prix de vente		
	Unité	Prix moyen (€)	
	t	350	
	q	35	