

RAPPORT D'ACTIVITÉS FINAL

Le rapport intermédiaire déjà soumis est une annexe de ce rapport et en fait partie intégrante

Projet n° : D65-1408

Acronyme : BetaProTech

Titre : Conception et validation d'un modèle de prévision et d'avertissement des maladies fongiques de la betterave avec étude des résistances et d'application des principes de la lutte intégrée (phase 2).

Date de démarrage et de fin du projet :

du 01/02/2021 au 31/03/2024

Durée du projet : 36 mois

Date de soumission du rapport :

Prénom, NOM du promoteur du projet :
Bernard Tychon

Fonction, titre : Professeur

e-mail : Bernard.Tychon@uliege.be

Téléphone : +32 (0)63230829

Nom de l'organisation : Université de Liège
– UR SPHERES

Adresse de l'organisation

Heidi, PITTOMVILS

Directeur Général

h.pittomvils@irbab.be

+32 477 16 11 37

IRBAB-KBIVB

Molenstraat 45, 3300 TIENEN

(à répéter autant de fois que de partenaires)

Résumé du programme et objectifs initialement prévus (300 mots maximum)

Le projet D65-1408, lancé en 2021, vise à améliorer la gestion de la cercosporiose dans les cultures de betterave sucrière en appliquant les principes de la lutte intégrée. En partenariat avec l'Université de Liège (Uliège), l'Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la Betterave (IRBAB) et AgrOptimize, ce projet cherche à optimiser un modèle de simulation de la cercosporiose et à intégrer de nouveaux outils pour une prédiction précise et une intervention efficace.

2021 : Validation et Premier Bilan

En 2021, Uliège a développé et validé un modèle de simulation pour prédire les infections de cercosporiose, basé sur les données de l'IRBAB et la plateforme AgrOptimize. Les performances du modèle ont été testées sur des données de 13 sites (2018-2020) et ont montré une bonne concordance avec les infections réelles, avec des performances remarquables pour les trois modèles testés (M1, M2, M3).

2022 : Enjeux et Résolutions Techniques

En 2022, le projet a rencontré des défis techniques, notamment des incohérences entre les simulations et les observations de terrain, principalement dues à des problèmes de serveur et de génération de données météorologiques. Ces problèmes ont souligné l'importance des données météorologiques fiables pour les simulations. Des ajustements ont été proposés pour améliorer le modèle.

2023 : Confirmation des Tendances et Approfondissement des Analyses

En 2023, le projet a confirmé l'efficacité du modèle de simulation, bien que des conditions climatiques favorables aient accentué la cercosporiose, nécessitant une intervention précoce. Une étude approfondie sur les facteurs météorologiques favorisant l'oïdium a également été menée.

Conclusion

Le projet D65-1408 a réalisé des avancées significatives dans la gestion de la cercosporiose de la betterave sucrière, fournissant des outils de simulation robustes pour aider les agriculteurs à optimiser leurs traitements, réduire l'utilisation de produits phytosanitaires, et maintenir la qualité et la quantité des récoltes. Cette initiative renforce la résilience de l'agriculture belge face aux défis phytosanitaires, tout en promouvant des pratiques durables et respectueuses de l'environnement.

1. Synthèse de la totalité des résultats acquis au cours de la recherche

Texte continu de max.10 pages avec éventuellement tableaux, schémas, graphiques

Durant ces 3 années, les essais menés ont eu pour objectif d'améliorer et d'évaluer le modèle en prenant en compte la sensibilité de 3 variétés différentes.

Les résultats résumés ci-après peuvent être retrouvés dans les rapports des années concernées.

En 2021, 4 essais ont été menés à Chièvres, Vellereille-lez-Brayeux, Lauw et Sauvenière.

En 2022, 4 essais ont été menés à Braffe, Jandrain, Tongres et Wagnelée.

En 2023, 4 essais ont été menés à Briffoeil, Luttre, Vechmaal et Perwez.

Le protocole de ces essais est resté le même durant les 3 années. Il a été précisé en début de rapport. Evidemment, les traitements n'ont pas toujours pu être réalisés au moment exact où cela aurait dû se faire, en raison des conditions climatiques (pluie ou vent). Ces conditions sont les mêmes dans la pratique.

Incidence de la cercosporiose dans les témoins non traités

Ci-dessous, le Tableau 1 représente le pourcentage des feuilles touchées par la cercosporiose dans tous les sites étudiés et ce, pour chaque variété. Sur base de ces données, il est nécessaire de remarquer que la cercosporiose se développe différemment selon les années. Les premiers seuils de traitement ont été atteints en semaine 30 en 2021, en semaine 29 en 2022 alors que c'était en semaine 31 en 2023. La pression la plus élevée a été remarquée en 2023 bien que certains sites (Lauw en 2021 et Tongres, Braffe en 2022) étaient fortement touchés également. Mais, en 2023, la pression fut élevée sur presque l'ensemble du territoire. Ceci renforce l'idée de mettre en place un outil d'aide à la décision pour aiguiller l'agriculteur dans ses choix de traitement.

Tableau 1 : Incidence (% de feuilles atteintes) de l'oïdium (ERYSBE), de la cercosporiose (CERCBE) et de la rouille (UROME) en fonction des semaines pour les essais 2021, 2022, 2023

CERCBE 2021												
Variété	Camelia				Caprianna				Raison			
	LA	SA	CH	VE	LA	SA	CH	VE	LA	SA	CH	VE
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	1	2	0	2	1	0	1	0	1	0	0	0
30	8	1	7	5	6	1	7	8	4	0	1	8
31	12	4	17	5	10	9	4	7	12	2	5	9
32	28	4	-		14	-	-		20	8	-	
33	55	21	55	24	47	18	44	15	55	-	32	14
34	87	-	91	82	88	38	65	63	90	57	53	65

CERCBE 2022												
Variété	Camelia				Caprianna				Raison			
	TO	WA	BR	JA	TO	WA	BR	JA	TO	WA	BR	JA
28	1	1	2	0	1	0	0	0	2	0	1	0
29	8	3	6	2	9	2	6	4	8	1	7	5
30		4	24	1		4	17	6		5	22	
31	13	4		7	11	5		1	11			0
32	23	7	44		16		41	5	12	7	26	4
33	48		-	10	31	11	-	12	47	6	-	7
34	-	18	-	11	-	14	-	27	-	14	-	16

CERCBE 2023												
Variété	Baboon				Caprianna				Raison			
	BF	VM	LU	PE	BF	VM	LU	PE	BF	VM	LU	PE
28	2	2	0	4	1	1	1	0	4	0	1	0
29	0	0	0	0	1	0	1	1	2	0	0	0
30	1	1	1	0	1	0	1	3	1	1	0	1
31	4	4	8	4	2	2	6	1	5	0	1	2
32	20	20	22	19	13	12	25	15	7	4	15	7
33	35	35	54	28	28	29	39	33	19	14	41	19
34	53	53	89	45	30	30	84	39	31	32	75	26
35	79	79	97	84	65	65	100	55	68	37	93	44

Cotations cercosporiose

Ci-dessous sont reprises l'ensemble des dernières cotations réalisées dans chaque essai. Cela donne une information sur la santé du feuillage en fin de saison en fonction des différents traitements. Selon les résultats de l'analyse statistique, les résultats sont présentés pour les 3 variétés simultanément ou pour les 3 variétés séparément.

Tableau 2 : Résultats des observations réalisées dans tous les essais 2021, 2022, 2023 pour la cercosporiose (cotation à la parcelle)

2021																	
		LA		SA		CH						VE					
		Cotation 12/10		Cotation 20/10		Cotation 26/10						Cotation 13/10					
		%		%		%						%					
Traitements	1	47,92	c	82,00	c	82,50	bc	50,00	b	40,00	c	67,50	b	63,75	b	55,00	b
	2	47,92	c	81,92	c	73,75	c	50,00	b	40,00	c	67,50	b	63,75	b	50,00	b
	3	70,42	b	90,17	b	93,25	a	75,00	a	75,00	b	88,50	a	75,00	a	82,50	a
	4	83,00	a	94,42	a	95,75	a	83,25	a	84,25	a	93,25	a	84,25	a	92,00	a
	5	76,58	ab	90,17	b	89,00	ab	75,75	a	75,00	b	90,25	a	75,00	a	82,50	a
	6	74,67	b	94,17	a	94,50	a	79,25	a	77,50	b	91,50	a	81,75	a	90,25	a
					Raison		Caprianna		Camelia		Raison		Caprianna		Camelia		

2022																					
		BR		TO						WA						JA					
		Cotation 18/1		Cotation 26/10						Cotation 26/10						Cotation 19/10					
		%		%						%						%					
Traitements	1	23,75	c	60,00	d	17,50	c	10,00	c	71,25	b	32,50	c	32,50	c	86,75	c	63,75	c	40,00	d
	2	26,67	c	60,00	d	21,25	c	10,00	c	71,25	b	32,50	c	32,50	c	88,50	bc	67,50	c	50,00	cd
	3	50,83	b	75,00	c	36,25	b	25,00	b	86,75	a	63,75	b	63,75	b	94,50	ab	80,00	ab	50,00	cd
	4	75,25	a	85,00	a	67,50	a	40,00	a	93,25	a	80,00	a	80,00	a	95,75	a	86,75	a	82,50	a
	5	25,00	c	77,50	bc	40,00	b	25,00	b	67,50	b	36,25	c	36,25	c	90,25	abc	77,50	b	58,75	bc
	6	25,42	c	81,75	ab	40,00	b	25,00	b	73,75	b	32,50	c	32,50	c	91,50	abc	77,50	b	67,50	b
		Raison		Caprianna		Baboon		Raison		Caprianna		Baboon		Raison		Caprianna		Baboon			

2023													
		BF		VM		LU		PE					
		Cotation 13/10		Cotation 23/10		Cotation 23/10		Cotation 11/10					
		%		%		%		%					
Traitements	1	34,17	d	28,33	c	28,33	c	40,00	c	2,50	d	0,00	d
	2	35,42	d	29,58	c	29,58	c	36,25	c	2,50	d	5,00	cd
	3	43,75	c	44,17	b	44,17	b	60,00	b	17,50	b	10,00	bc
	4	59,58	a	59,58	a	59,58	a	77,50	a	40,00	a	25,00	a
	5	51,67	b	41,67	b	41,67	b	60,00	b	21,25	b	17,50	ab
	6	61,67	a	57,50	a	57,50	a	63,75	b	10,00	c	17,50	ab
								Raison		Caprianna		Baboon	

En 2021, lorsque la pression en maladie était faible, un ou 2 traitements, peu importe le moment où ils étaient réalisés, ont permis de gérer de la même façon la cercosporiose (en tout cas au niveau foliaire). Par contre, lorsque 2 traitements étaient nécessaires, c'est souvent les 2 traitements au seuil qui ont permis d'atteindre la meilleure santé foliaire. En 2022, les résultats du modèle étaient insatisfaisants à cause des données météo erronées qui ont été abordées dans le rapport précédent. En 2023, le modèle a relativement bien fonctionné dans ces essais et a donc permis d'obtenir une bonne santé foliaire également pour l'objet 6, statistiquement similaire à l'objet 4.

Effet sur le rendement

Ci-dessous sont repris l'ensemble des rendements sucre blanc (kg/ha) de chaque essai. Selon les résultats de l'analyse statistique, les résultats sont présentés pour les 3 variétés simultanément ou pour les 3 variétés séparément.

Globalement, le rendement suit la tendance de la santé du feuillage. Concrètement, là où la santé foliaire était élevée, le rendement l'est aussi. Par contre, en 2023, bien qu'une santé du feuillage plus élevée fut observée pour l'objet 4 ou objet 4 et 6, le rendement en sucre blanc ne semble pas traduire ces différences. Cela peut-être expliqué par la très forte pression en cercosporiose. La pression était telle que peut-être les petites différences qui subsistaient en termes de santé foliaire ne se sont pas traduites par une influence sur le rendement.

Tableau 3 : Résultats de rendement sucre blanc (kg/ha) pour les essais 2021, 2022, 2023

		2021											
		SA		CH		VE		LA					
		Sucre blanc		Sucre blanc		Sucre blanc		Sucre blanc					
		kg/ha		kg/ha		kg/ha		kg/ha					
Traitements	1	15794	c	15216	c	16371	c	12891	c	15394	d	13718	d
	2	15546	c	15391	c	16548	c	12844	c	15683	d	13188	d
	3	16537	b	16401	b	18110	ab	14018	b	16913	c	14419	c
	4	17199	a	16769	a	18242	ab	14824	a	18299	a	16062	a
	5	16491	b	16407	b	17882	b	13920	b	17317	bc	15180	b
	6	17000	a	16796	a	18842	a	14038	b	17757	b	15262	b
								Raison		Caprianna		Camelia	

		2022							
		BR		TO		WA		JA	
		Sucre blanc		Sucre blanc		Sucre blanc		Sucre blanc	
		kg/ha		kg/ha		kg/ha		kg/ha	
Traitements	1	18891	c	18273	c	17241	b	16929	c
	2	19130	c	18032	c	17501	b	16852	c
	3	20017	b	19233	b	18277	a	17642	ab
	4	21018	a	20156	a	18675	a	18152	a
	5	18870	c	19436	b	17030	b	17713	ab
	6	18888	c	19088	b	17321	b	17429	b

		2023							
		BF		VM		LU		PE	
		Sucre blanc		Sucre blanc		Sucre blanc		Sucre blanc	
		kg/ha		kg/ha		kg/ha		kg/ha	
Traitements	1	15166	b	16593	b	12610	c	17445	b
	2	15302	b	16789	b	12788	c	17103	b
	3	16089	a	17804	a	13414	b	18072	a
	4	16340	a	17966	a	13890	a	18471	a
	5	16276	a	17600	a	13508	ab	18371	a
	6	16508	a	18233	a	13374	b	18162	a

Evaluation du modèle au sein de réseau pilote

En 2021, le modèle a été testé sur 43 champs. La première alerte avait été donnée au bon moment sur 30% des champs.

En 2022, le modèle a été testé sur 23 champs. La première alerte avait été donnée au bon moment dans 13% des cas. Cela s'expliquait par un problème dans les données météorologiques utilisées.

Enfin, en 2023, le modèle a été testé sur 18 champs. Dans 61% des champs, la première alerte a été donnée au moment opportun.

2023 est donc l'année avec le meilleur résultat. 2023 était une année avec un été assez humide ce qui a permis le déclenchement de nombreuses courbes d'infection. À l'avenir, il faudra évaluer ce modèle dans le cas où une année sèche viendrait à se présenter.

Synthèse de WP 2 entre 2021 et 2023: Modélisation du développement des maladies en fonction des données météo et agronomiques sur base des relations établies entre ces paramètres et les observations terrain de symptômes de maladies. Développement des modèles Rouille et Oïdium. Etablir une relation incidence-sévérité.

Modélisation de la Cercosporiose

Année 2021.

La synthèse de 2021 met en évidence les défis et les avancées dans la lutte contre la cercosporiose de la betterave à sucre (CLS), causée par le champignon *Cercospora beticola*. Cette maladie, répandue et destructrice, affecte gravement le rendement et la qualité de la betterave à sucre. Les conditions météorologiques favorables, telles que des températures et une humidité appropriée, favorisent la propagation de la maladie, avec des pertes de rendement pouvant atteindre 40%.

La recherche s'est concentrée sur l'identification des facteurs météorologiques propices à l'infection par *C. beticola*, utilisant des modèles prédictifs basés sur les données climatiques (Figure 1). Des études ont été menées sur 13 sites en Belgique, couvrant plusieurs saisons de culture, pour évaluer les conditions optimales de température, d'humidité et de précipitations pour le développement de la CLS. Des modèles météorologiques ont été développés pour prédire les périodes d'infection, et leur performance a été évaluée.

Les résultats ont montré que des conditions météorologiques spécifiques, telles que des températures diurnes supérieures à 16°C, une humidité relative élevée et des précipitations, étaient associées à une augmentation du risque d'infection par *C. beticola*. Des modèles prédictifs ont été développés pour aider à la gestion des maladies, permettant une application plus efficace des fongicides.

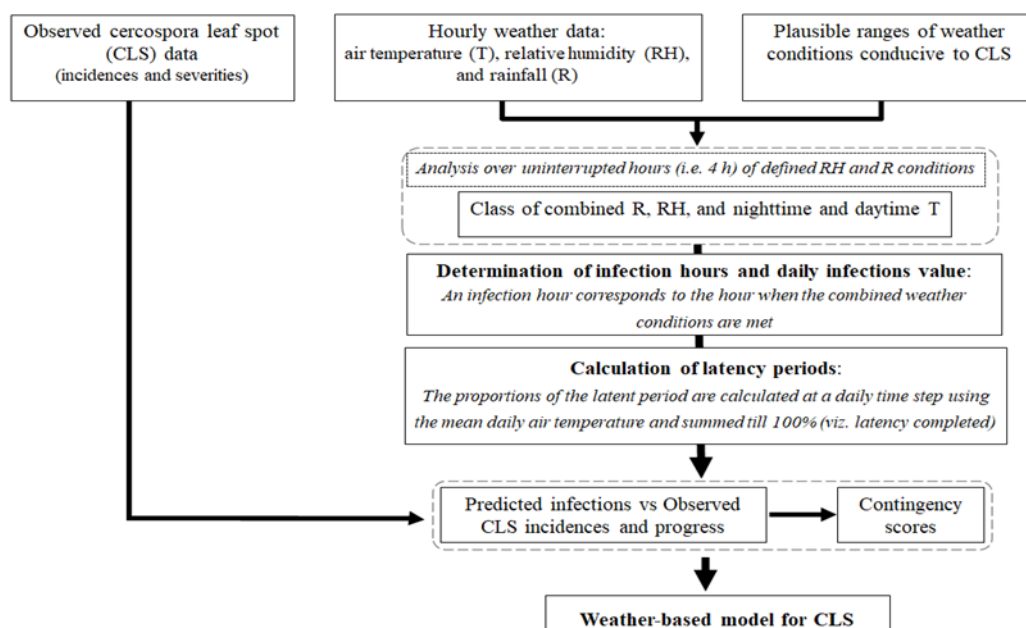


Figure 1 Organigramme décrivant l'approche de modélisation utilisée pour prédire les événements d'infection de la betterave sucrière par *Cercospora beticola*.

Des modèles météorologiques ont été développés pour prédire les événements d'infection potentiels. Les modèles les plus performants ont montré des valeurs acceptables de probabilité de détection (POD) et d'indice de réussite critique (CSI), suggérant que les événements d'infection peuvent se produire à des températures nocturnes relativement basses, proches de 10°C, en présence d'une humidité relative élevée (Figures 2 et 3).

De plus, des progrès ont été réalisés dans le développement de systèmes d'aide à la décision (DSS) pour la gestion de la CLS. Ces systèmes intègrent les données météorologiques pour fournir des recommandations de traitement fongicide en temps réel, contribuant ainsi à une meilleure gestion de la maladie.

Ces avancées sont cruciales pour l'industrie sucrière européenne, en particulier avec la fin du système de quotas de sucre de l'UE, ce qui souligne l'importance d'une production maximisée et d'une gestion efficace des maladies pour assurer la compétitivité et la durabilité des producteurs de betteraves sucrières.

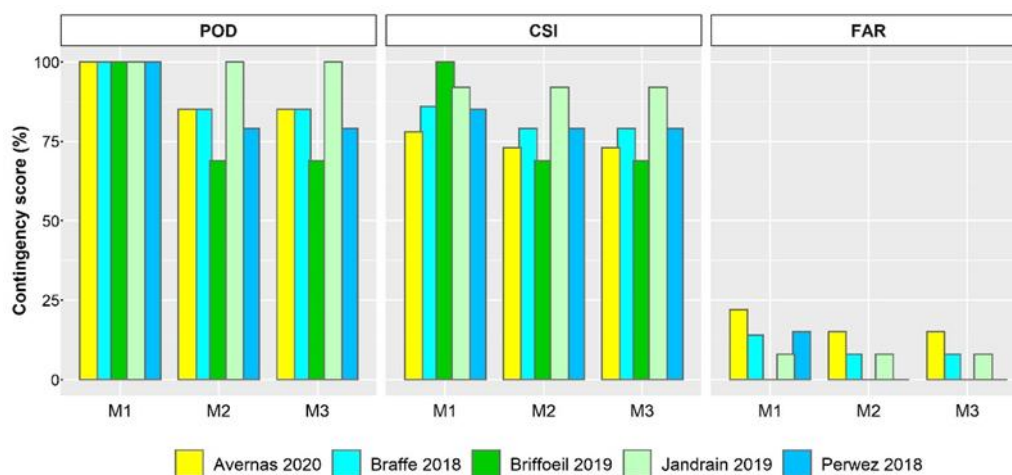


Figure 2. Scores de contingence statistiques pour les trois modèles météorologiques les plus performants au cours de la phase de validation identifiés comme M1, M2, M3 : modèles n° 1, n° 2 et n° 3, respectivement (voir le tableau 4). POD : probabilité de détection de la cercosporiose (score parfait = 100 %) ; CSI : indice de réussite critique (score parfait = 100 %) ; FAR : taux de fausses alarmes (score parfait = 0%).

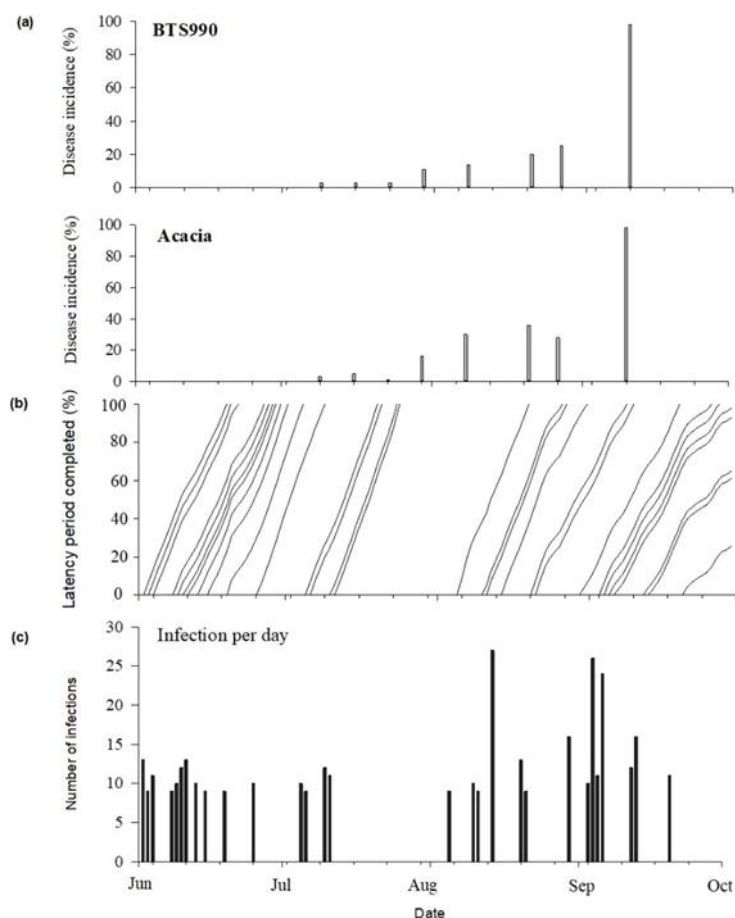


Figure 3. . Incidence mesurée de la tache foliaire de *Cercospora* (a), période de latence simulée (b) et événements d'infection par *Cercospora beticola* simulés sur la betterave à sucre (c) à Perwez pendant la saison de culture 2018. Les périodes d'infection ont été simulées à l'aide du modèle météorologique #1 (voir tableau 4). Les cultivars BTS990 et Acacia ont une sensibilité au CLS de 6 (modérément résistant) et 4 (sensible), respectivement.

Année 2022.

La saison 2022 a été marquée par un examen minutieux de l'utilisation des données météorologiques simulées et en ligne pour surveiller la cercosporiose de la betterave sucrière. Ce contexte a soulevé des questions sur la source et la fiabilité de ces données, ainsi que sur leurs opportunités, défis et contraintes dans la modélisation des maladies des cultures.

Les opportunités sont claires : les données météorologiques simulées offrent une précision et une disponibilité accrues, adaptées à des échelles de temps et d'espace spécifiques. Elles permettent également une adaptation aux besoins spécifiques des cultures et facilitent la planification et la prise de décision pour les agriculteurs et les décideurs.

Cependant, ces opportunités sont confrontées à plusieurs défis et contraintes. La précision des modèles météorologiques, la gestion des incertitudes, l'accès aux données en ligne, l'adaptabilité aux conditions locales et l'intégration avec d'autres facteurs sont autant de défis à relever. Par exemple, la

précision des modèles climatiques utilisés pour générer les données simulées est cruciale, tout comme la gestion des incertitudes inhérentes aux données météorologiques.

Dans le cas spécifique du site de Braffe, des problèmes liés aux données météorologiques ont été identifiés, nécessitant une collaboration avec des experts pour obtenir des données corrigées en temps réel. Les analyses ont montré l'importance des données précises pour garantir des résultats fiables dans la modélisation des infections.

La mise en application du modèle pour la saison 2021-2022 a été un succès (Tableau 4), démontrant l'efficacité de l'utilisation des données météorologiques simulées pour prédire et gérer la cercosporiose de la betterave. La calibration du modèle en fonction des conditions spécifiques de la Belgique, l'intégration des observations de terrain et des seuils de traitement recommandés ont contribué à des résultats satisfaisants.

En conclusion, l'étude souligne l'importance des données météorologiques simulées pour la modélisation et la gestion des maladies des cultures, offrant des avantages significatifs pour les agriculteurs et les décideurs. Cependant, elle met également en lumière les défis à relever pour garantir la précision et la fiabilité des résultats, notamment en ce qui concerne la validation des modèles et la gestion des incertitudes.

Tableau 4. Synthèse comparative des seuils de traitements fournis par l'IRBAB et ceux du modèle.

Essai	Coordonnées GPS	Observations CERCBE			Model	
		1ères taches	Seuil atteint T1	Seuil atteint T2	Seuil atteint T1	Seuil atteint T2
Bassenge	50.770300, 5.581753	11-juil	18-juil	08-août	14-juil	14-août
Bertem	50.876356, 4.651297	19-juil	01-août	05-sept	01-août	05-sept
Braffe	50.553436, 3.568978	12-juil	18-juil	08-août	14-juil	14-août
Briffoeil	50.555300, 3.523636	12-juil	18-juil	16-août	14-juil	14-août
Bunsbeek	50.848744, 4.933047	18-juil	25-juil	16-août	14-juil	15-août
Cordes	50.678888, 3.540587	12-juil	12-juil	01-août	14-juil	14-août
Chièvres	50.558867, 3.784792	12-juil	26-juil	16-août	01-août	02-sept
Crisnée	50.719183, 5.412419	18-juil	25-juil	16-août	17-juil	15-août
Huldenberg	50.772372, 4.581186	11-juil	01-août	05-sept	01-août	06-sept
Jandrain	50.677386, 4.973447	18-juil	18-juil	16-août	14-juil	14-août
Kluisbergen	50.803350, 3.545725	12-juil	19-juil	08-août	11-juil	11-août
Lennik	50.822897, 4.185353	12-juil	26-juil	16-août	17-juil	15-août
Limont	50.665933, 5.306900	11-juil	01-août	22-août	01-août	28-août
Meux	50.567650, 4.780569	18-juil	01-août	05-sept	02-août	07-sept
Mévergnies	50.617942, 3.860439	12-juil	26-juil	16-août	17-juil	26-août
Nethen	50.777369, 4.697708	18-juil	25-juil	16-août	17-juil	13-août
Opvelp	50.817931, 4.782350	18-juil	18-juil	16-août	17-juil	13-août
Petit-Hallet	50.683800, 5.022881	25-juil	25-juil		17-juil	14-août
Poelkapelle	50.950333, 2.939444	19-juil	22-août		03-août	05-sept
Sauvenière	50.565169, 4.743564	18-juil	16-août		01-août	05-sept

Solières	50.470208, 5.191397	11-juil	01-août		01-août	05-sept
Tongres	50.772811, 5.433222	11-juil	18-juil	16-août	17-juil	15-août
Wagnelée	50.537931, 4.526947	18-juil	25-juil	16-août	17-juil	29-août

Année 2023.

La transition vers une agriculture plus durable est une priorité majeure pour l'Europe, confrontée à des défis tels que le changement climatique et la sécurité alimentaire. Dans ce contexte, la gestion efficace des maladies des cultures, comme la cercosporiose et l'oïdium des betteraves sucrières, est cruciale. Le projet "BetaProTech", notamment le WP 2, se concentre sur la modélisation du développement de ces maladies en fonction des données météorologiques et agronomiques.

Le WP 2 vise à développer des modèles prédictifs robustes pour simuler l'incidence et la sévérité de la cercosporiose et de l'oïdium. Ces modèles fournissent aux agriculteurs des outils décisionnels pour optimiser les interventions phytosanitaires, réduisant ainsi l'utilisation des fongicides tout en maintenant la rentabilité des exploitations agricoles. La collecte de données précises, l'observation des symptômes des maladies, l'analyse des relations entre les paramètres environnementaux et le développement des maladies, ainsi que le développement et la validation des modèles sont des étapes clés de ce processus.

La saison 2022-2023 a été marquée par une forte pression de la cercosporiose, illustrant la nécessité d'une gestion proactive. Les conditions climatiques chaudes et humides ont favorisé la prolifération de la maladie, mettant en évidence l'importance de la sélection variétale et des traitements fongicides. La comparaison entre les années montre une évolution significative de l'incidence et de la sévérité de la maladie, soulignant l'impact des conditions locales et des pratiques agronomiques.

Le modèle développé pour la cercosporiose a démontré sa précision dans la prédiction de l'apparition de la maladie, permettant une gestion éclairée des cultures. Les seuils d'alerte et les recommandations de traitement sont basés sur les prédictions du modèle, offrant aux agriculteurs des directives pour une intervention efficace (Tableau 5). Cependant, des ajustements sont nécessaires pour prendre en compte les variations météorologiques et les spécificités locales.

En conclusion, l'utilisation de modèles basés sur des données météorologiques simulées offre des avantages significatifs pour la gestion des maladies des cultures. En combinant technologie avancée et observations rigoureuses, il est possible de développer des stratégies de gestion plus efficaces, répondant ainsi aux défis posés par le changement climatique et ses effets sur l'agriculture.

Tableau 5. Synthèse comparative des seuils de traitements fournis par l'IRBAB et ceux du modèle.

Localisation des champs	Prédictions du modèle							Observations CERCBE		
	Infection avant 15/06	Infection primaire		Infection secondaire		Infection après rémanence		1ères taches	Seuil atteint T1	Seuil atteint T2
	Début	Début	70%	Début	70% d'incubation = alerte 1	Début	70% incubation = alerte 2			
Bierbeek 23	07-mai	19-juin	28-juin	19-juil	31-juil	26-août	07-sept	10-juil	31-juil	21-août
Bierwart 23	22-mai	19-juin	29-juin	27-juil	10-août	11-sept	24-sept	18-juil	21-août	/
Borgloon 23	22-mai	20-juin	29-juin	19-juil	31-juil	31-août	10-sept	17-juil	31-juil	21-août
Bossuit 23	08-mai	20-juin	30-juin	23-juil	04-août	24-août	05-sept	10-juil	09-août	28-août
Briffoeil Var 23	08-mai	18-juin	27-juin	23-juil	04-août	24-août	05-sept	10-juil	10-juil	21-août
Crisnée 23	22-mai	20-juin	30-juin	19-juil	31-juil	11-sept	22-sept	24-juil	31-juil	21-août
Gingelom 23	22-mai	19-juin	28-juin	19-juil	31-juil	31-août	10-sept	11-juil	07-août	30-août
Houtem 23	04-mai	19-juin	28-juin	19-juil	31-juil	31-août	10-sept	25-juil	31-juil	21-août
Huldenberg 23	22-mai	18-juin	27-juin	04-juil	14-juil	30-juil	12-août	25-juil	08-août	28-août
Lennik IPM 23	22-mai	20-juin	30-juin	23-juil	04-août	24-août	05-sept	01-août	01-août	21-août
Luttre Var 23	22-mai	19-juin	29-juin	27-juil	10-août	26-août	07-sept	11-juil	01-août	21-août
Meux 23	22-mai	19-juin	29-juin	27-juil	10-août	12-sept	25-sept	11-juil	01-août	21-août
Mévergnies 23	08-mai	18-juin	28-juin	11-juil	22-juil	11-août	21-août	10-juil	10-juil	14-août
Oreye 23	22-mai	20-juin	30-juin	19-juil	31-juil	11-sept	22-sept	10-juil	24-juil	21-août
Perwez sporenV 23	22-mai	19-juin	29-juin	27-juil	10-août	01-sept	10-sept	18-juil	07-août	30-août
Saint-Georges 23	22-mai	19-juin	29-juin	23-juil	05-août	11-sept	23-sept	18-juil	08-août	28-août
Vechmaal sporenV 23	22-mai	20-juin	29-juin	19-juil	31-juil	31 août	10-sept	24-juil	07-août	28-août
Vellereille 23	08-mai	19-juin	29-juin	23-juil	05-août	26-août	07-sept	24-juil	14-août	/

Modélisation de l'Oïdium

Année 2021.

Au cours de l'année 2021, une synthèse bibliographique exhaustive a été entreprise pour identifier les paramètres météorologiques qui influencent l'émergence de l'oïdium, une maladie redoutée qui peut engendrer des dommages considérables sur les cultures lorsque les conditions atmosphériques lui sont favorables. Les estimations suggèrent que les pertes de rendement peuvent atteindre jusqu'à 35%, un chiffre alarmant qui souligne l'urgence de comprendre les facteurs déterminants de cette pathologie. Parmi ces facteurs, l'âge des plantes et le moment de l'infection jouent un rôle prépondérant, tandis que les caractéristiques climatiques, notamment les écarts de température diurnes et nocturnes, exercent une influence significative sur l'évolution de la maladie.

Il est à noter que l'oïdium prospère particulièrement dans des climats secs ou semi-arides, se développant de manière optimale lorsque les températures oscillent entre 15 et 30°C, avec une préférence pour une moyenne de 25°C. De plus, le champignon responsable de l'oïdium, *Erysiphe betae*, réagit de manière sensible aux conditions d'humidité, avec une germination des conidies favorisée par une humidité relative basse, oscillant entre 30 et 40%. Toutefois, une humidité trop élevée, dépassant les 60%, peut inhiber la production et la viabilité des conidies, réduisant ainsi le risque d'infection.

Le cycle de vie de ce champignon est étroitement lié à celui de son hôte, la betterave, ainsi qu'aux conditions environnementales dominantes. Chaque année, le champignon est introduit en Belgique sous forme de conidies aéroportées, transportées par les vents vers les zones de culture de betteraves, généralement entre la fin juin et la fin juillet. Cependant, la germination et l'infection ne se produisent que si les conditions sont propices, notamment en termes d'humidité et de température.

En outre, le type d'irrigation utilisé peut également influencer le développement de la maladie. Les systèmes d'irrigation par aspersion, en favorisant une humidité relative plus élevée et une teneur en eau accrue à la surface des feuilles, peuvent potentiellement accélérer la propagation de l'oïdium. Cette observation souligne l'importance cruciale de la gestion méticuleuse de l'eau et des pratiques d'irrigation dans la lutte contre cette maladie dévastatrice.

Années 2022 et 2023.

La détermination des conditions optimales d'infection pour l'oïdium est une entreprise complexe qui nécessite une analyse minutieuse des paramètres météorologiques. Au cours des années 2022 et 2023, notre recherche s'est concentrée sur deux aspects principaux : la température et l'humidité relative, afin de mieux comprendre leur influence sur le développement de cette maladie dévastatrice.

En ce qui concerne la température, nos travaux ont consisté à évaluer divers indices thermiques pour déterminer les conditions favorables à l'oïdium. Nous avons constaté qu'une température moyenne journalière supérieure à 15°C, combinée à des différences spécifiques entre les températures minimales et maximales, favorise la propagation du champignon responsable de l'oïdium. Ces calculs nous ont permis de repérer les moments et les situations où les températures sont optimales pour l'infection, offrant ainsi des informations précieuses pour prédire les périodes à risque et orienter les décisions de gestion et de prévention de la maladie.

Parallèlement, nous avons également examiné l'humidité relative, un autre facteur déterminant dans le développement de l'oïdium. En analysant les variations quotidiennes de l'humidité relative par rapport à un

optimum de 70%, nous avons pu identifier les conditions les plus propices à l'épanouissement du champignon. Les résultats ont montré une corrélation entre les périodes de température supérieure à 15°C et une humidité relative dépassant 70%, soulignant ainsi l'importance de surveiller attentivement ces paramètres pour anticiper les épidémies potentielles.

L'analyse conjointe de la température et de l'humidité relative a également révélé des interactions complexes entre ces deux facteurs, influençant ainsi le développement de l'oïdium (Figure 4). Par exemple, une température modérée combinée à une humidité élevée crée un environnement particulièrement propice à la germination des spores et à la prolifération du champignon. Cette compréhension approfondie des interactions climatiques est cruciale pour une gestion efficace de l'oïdium, permettant d'anticiper les conditions favorables à son apparition et d'adapter les stratégies de protection des cultures en conséquence.

En outre, nos recherches ont souligné l'impact de la pluie sur le déclenchement de l'oïdium, tout en mettant en évidence l'importance du timing des précipitations dans la dynamique de la maladie. Des observations géographiques ont également été effectuées, révélant des variations dans la prévalence de l'oïdium selon les sites d'étude, ce qui souligne l'importance des microclimats locaux dans le développement de la maladie.



Figure 4. . Seuils d'avertissement de l'oïdium pour le site de Briffueil en 2023. Tn : Température nocturne, Td : Température diurne, Rh : relative humidité.

2. Conclusions exhaustives d'interprétation des résultats

Texte continu de max.5 pages avec éventuellement tableaux, schémas, graphiques

Le projet D65-1408 représente une avancée majeure dans la gestion de la cercosporiose de la betterave sucrière, une maladie fongique dévastatrice entraînant d'importantes pertes économiques pour les agriculteurs. Lancé en 2021, ce projet ambitieux vise à promouvoir les principes de la lutte intégrée en fournissant aux agriculteurs un outil précis pour déterminer le moment optimal de traitement, réduisant ainsi l'utilisation de produits phytosanitaires tout en maintenant la qualité et la quantité des récoltes.

L'Université de Liège a joué un rôle central dans le développement d'un modèle de simulation sophistiqué pour prévoir l'infection de la cercosporiose, basé sur des données de suivi de l'IRBAB et validé en ligne via la plateforme d'AgrOptimize. Au cours des trois années du projet, ce modèle a été rigoureusement évalué et perfectionné, démontrant son efficacité dans la prédiction de l'infection et guidant les agriculteurs vers des décisions éclairées en matière de traitement.

C'est un modèle robuste qui a été développé en se basant sur les techniques d'intelligence artificielle en analyse les différentes combinaisons de trois paramètres météorologiques essentiels à savoir la température T (diurne et nocturne), la pluie (R) et l'humidité relative (RH). Au début, l'analyse a mis en évidence 75 combinaisons.

Sur la base des classes dominantes de R, RH et T diurne et nocturne, 14 modèles météorologiques ont été pris en compte pour la phase de test (tableau 6). Chaque modèle a été défini comme une combinaison de plages définies de R horaire, d'humidité relative et de T diurne et nocturne sur des heures ininterrompues. Des modèles sans condition de pluie spécifique requise (absence ou présence de pluie) ont également été inclus pour évaluer l'importance de l'absence de pluie continue pendant les heures précédant le début probable d'un événement d'infection (modèles M13 et M14 dans le tableau 6).

Les performances des 14 modèles évalués variaient. Les valeurs moyennes sur tous les sites pour le POD et le CSI variaient de 24 % à 99 %, et de 24 % et 90 %, respectivement ; les valeurs FAR moyennes variaient de 3 à 11 % (tableau 7). Des POD et CSI acceptables ($\geq 60\%$) ont été trouvés pour les six premiers modèles (M1 à M6 ; Tableau 7). Les modèles M10 à M14 étaient ceux qui avaient les pires performances pour prédire les événements d'infection à *C. beticola*. Les valeurs moyennes de POD et de CSI pour les modèles M10 à M13 étaient inférieures à 30 %. De plus, pour sept des huit sites considérés lors de la phase de test, les modèles M10 à M13 n'ont pas simulé d'événement infectieux (indiqué par FAR = 0) ; seul Rutten 2020 avait une valeur FAR pour M10 à M12 (tableau 7). Pour le modèle M14, toutes les valeurs POD, FAR et CSI étaient de 0 quel que soit le site, suggérant l'importance de conditions pluvieuses continues pour déclencher une infection par *C. beticola* sur les sites d'étude en Belgique.

Tableau 6. Liste des modèles évalués lors de l'étape de test. Chaque modèle a été défini comme une combinaison de seuils définis de température horaire de l'air, de précipitations et d'humidité relative sur des heures ininterrompues.

Model	Hourly Rainfall (R)	Hourly Relative Humidity (RH)	Hourly Temperature (T; °C)	
			Nighttime	Daytime
M1	R $\geq$ 0.1 mm during the 4 preceding hours	RH > 90% during the first 4 h, then >60% during the following 9 h	T > 10	T > 16
M2			T > 15	T > 16
M3			T > 18	T > 16
M4	R $\geq$ 0.1 mm during the 4 preceding hours	RH > 95% during the first 4 h, then >60% during the following 9 h	T > 10	T > 16
M5			T > 15	T > 16
M6			T > 18	T > 16
M7	R $\geq$ 0.1 mm during the 4 preceding hours	RH > 90% during the first 4 h, then >60% during the following 9 h	T > 10	T > 20
M8			T > 15	T > 20
M9			T > 18	T > 20
M10	R $\geq$ 0.1 mm during the 4 preceding hours	RH > 95% during the first 4 h, then >60% during the following 9 h	T > 10	T > 20
M11			T > 15	T > 20
M12			T > 18	T > 20
M13			10 < T < 12	T > 16

M14	No specific rainfall condition required	RH > 95% during the first 4 h, then >60% during the following 9 h	10< T < 12	T > 20
------------	---	---	------------	--------

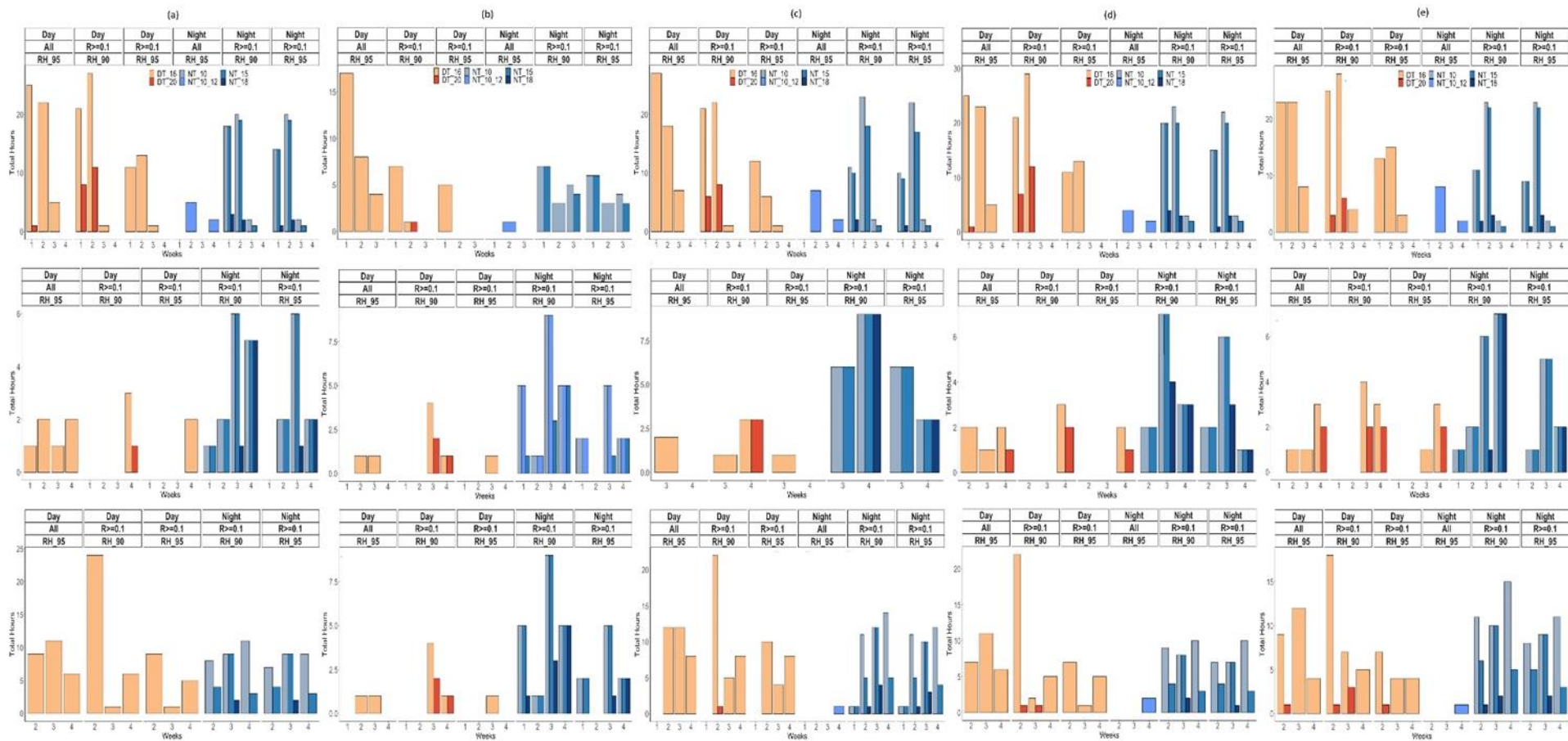


Figure 5. Heures totales hebdomadaires des conditions météorologiques durant les mois de juin (en haut) à août (en bas) 2018 à Avernas (a), Braffe (b), Perwez (c), Villiers-le-Peuplier (d) et Franc-Waret (e). Les conditions météorologiques sont présentées comme les combinaisons définies de précipitations (R), d'humidité relative (RH) et de température (T) rencontrées simultanément. HR_95 : $HR \geq 95\%$; HR_90 : $HR \geq 90\%$; DT_16 : $T \text{ diurne} \geq 16^\circ\text{C}$; DT_20 : $T \text{ diurne} \geq 20^\circ\text{C}$; NT_10 : $T \text{ nocturne} \geq 10^\circ\text{C}$; NT_15 : $T \text{ nocturne} \geq 15^\circ\text{C}$; NT_10_12 : $T \text{ nocturne entre } 10^\circ\text{C et } 12^\circ\text{C}$; NT_18 : $T \text{ nocturne} \geq 18^\circ\text{C}$. En journée : 7h00 à 20h59 ; nocturne : 21h00 à 6h59 le lendemain. (Notez les différences d'échelles sur l'axe des y.).

Les modèles les plus performants (ceux qui donnent des valeurs POD et CSI relativement élevées et des valeurs FAR relativement faibles) sont les modèles M1, M2 et M3 (tableau 7). Pour ces modèles, les valeurs POD et CSI étaient pour la plupart $\geq 80\%$ pour les sites d'étude considérés ; FAR variait de 0 à 20%. Les trois modèles étaient tous caractérisés par une combinaison de conditions pluvieuses continues pendant les quatre heures précédant le début probable d'un événement d'infection à *C. beticola*, HR > 90 % pendant les 4 premières heures et HR > 60 % pendant les 9 h suivantes, et T diurne > 16 °C, (Tableau 6). Les différences entre les modèles étaient liées à la plage de T nocturne : > 10 °C, > 15 °C et > 18 °C, pour M1, M2 et M3, respectivement (tableau 7). Les performances de M1, M2 et M3 indiquent que les événements d'infection à *C. beticola* peuvent potentiellement se produire à des températures nocturnes proches de 10 °C. La restriction des conditions d'humidité relative à > 95 % dans des conditions de pluie continue et une T diurne relativement plus élevée (modèles M10, M11 et M12) n'a pas permis d'obtenir de bonnes capacités de prédiction. Ainsi, dans les conditions environnementales observées au cours de la période d'étude, les conditions météorologiques relativement chaudes au cours de la période d'infection la plus critique pour les événements d'infection à *C. beticola* n'étaient pas propices au développement du CLS.

Tableau 7. Scores de contingence statistiques pour les trois modèles météorologiques les plus performants pendant la phase de test. M1–M13 : modèle 1 à modèle 13, respectivement. POD : probabilité de détection de la cercosporiose (meilleur score = 100 %) ; FAR : taux de fausses alarmes (meilleur score = 0 %) ; CSI : indice de réussite critique (meilleur score = 100 %). Les 3 modèles les plus performants sont soulignés (M1, M2 et M3). Toutes les valeurs POD, FAR et CSI pour le modèle M14 étaient de 0 (aucune simulation réalisée sur la base des conditions météorologiques combinées définies pour ce modèle) ; les statistiques n'ont donc pas été présentées.

Header	<u>M1</u>	<u>M2</u>	<u>M3</u>	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
Probability of detection (POD)													
Avernas 2018	100	73	80	75	75	75	33	33	33	22	20	20	20
Briffoeil 2020	100	94	95	88	88	88	72	73	73	36	36	36	38
Herstappe 2019	100	92	92	100	100	100	56	56	56	25	22	22	22
Meux 2019	100	83	83	50	50	50	44	44	44	29	29	29	25
Wagnéllie 2020	100	95	95	54	54	54	69	69	69	36	36	36	22
Waret 2018	91	82	80	90	73	73	43	38	38	29	29	29	43
Villers-le-Peuplier 2018	100	100	100	75	75	75	46	46	46	22	22	22	22
Rutter 2020	100	100	100	29	29	29	91	91	91	14	14	14	0
Mean — All sites	99	90	91	70	68	68	57	56	56	27	26	26	24
False alarm ratio (FAR)													
Avernas 2018	14	20	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Briffoeil 2020	8	10	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Herstappe 2019	14	14	8	0	0	0	17	17	17	0	0	0	0
Meux 2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wagnéllie 2020	10	10	10	13	13	13	0	0	0	0	0	0	0
Waret 2018	0	11	11	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
Villers-le-Peuplier 2018	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rutter 2020	6	6	6	50	50	50	10	10	10	50	50	50	0
Mean — All sites	9	11	10	8	8	9	3	3	3	6	6	6	0
Critical success index (CSI)													
Avernas 2018	86	62	73	75	75	75	33	33	33	22	20	20	20
Briffoeil 2020	92	85	81	88	88	88	72	73	73	36	36	36	38
Herstappe 2019	86	80	86	60	50	50	50	50	50	25	22	22	22
Meux 2019	100	83	83	50	50	50	44	44	44	29	29	29	25
Wagnéllie 2020	90	86	86	50	50	50	69	69	69	36	36	36	22
Waret 2018	91	75	73	90	73	67	43	38	38	29	29	29	43

Villers-le-Peuplier 2018	80	80	80	75	75	75	46	46	46	22	22	22	22
Rutter 2020	94	94	94	22	22	22	83	83	83	13	13	13	0
Mean — All sites	90	81	82	64	60	60	55	55	55	27	26	26	24

Comme cité-ci-dessus, la validation des périodes d'infection a montré un bon succès des performances du modèle. Avec une POD et un CSI proche de 100% et des fausses alertes inférieures à 20%, le modèle devient un outil incontournable pour les simulations de la cercosporiose.

Malgré quelques obstacles rencontrés en 2022, notamment des problèmes techniques liés à la fiabilité des données météorologiques, le projet a persisté dans son objectif de fournir un outil fiable et efficace pour la gestion de la cercosporiose (Figure 6). En 2023, une augmentation exponentielle des cas de cercosporiose a été observée, soulignant l'importance cruciale de pouvoir anticiper et réagir rapidement aux épidémies potentielles.

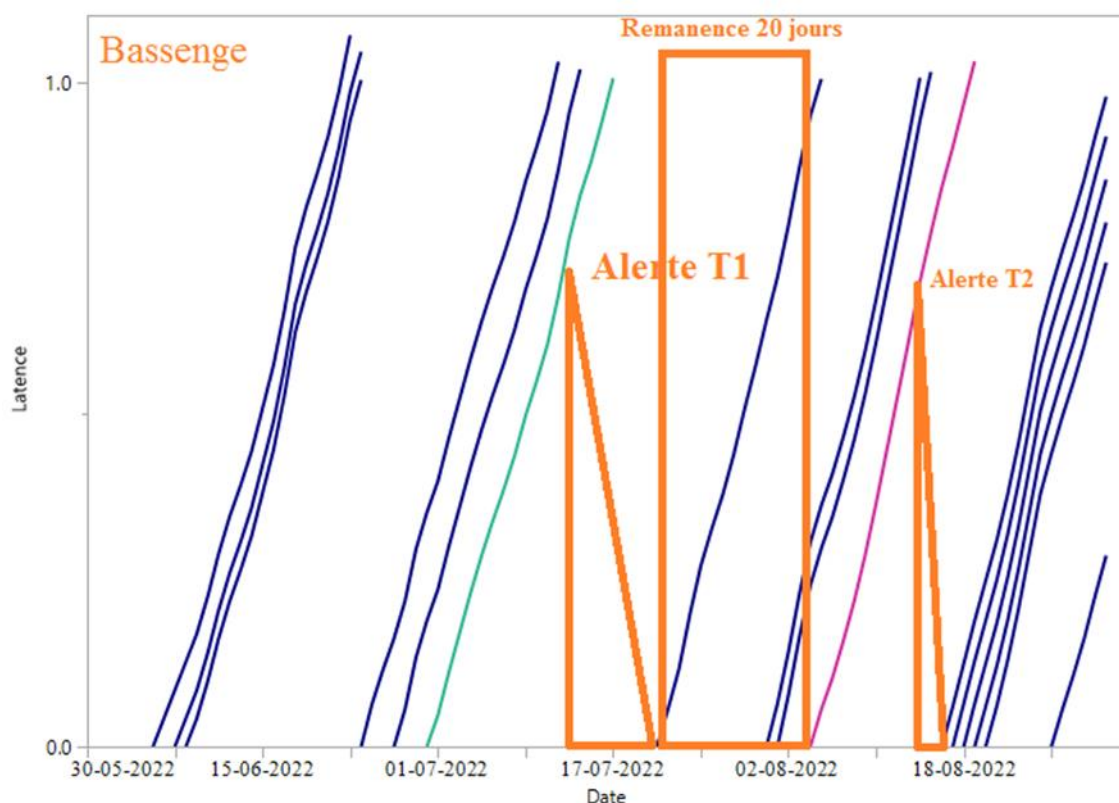


Figure 6. Mise en application du modèle à Bassenge en 2022.

L'étude des conditions météorologiques favorisant la maladie a également été approfondie, confirmant les tendances observées au fil des années. Les résultats obtenus jusqu'à présent soulignent l'impact positif du projet sur la gestion de la cercosporiose, tout en mettant en lumière les défis persistants auxquels les agriculteurs sont confrontés.

En conclusion, le projet D65-1408 représente une avancée significative dans la lutte contre la cercosporiose de la betterave sucrière. En combinant recherche scientifique de pointe et collaboration étroite avec les acteurs du terrain, ce projet offre une solution prometteuse pour une gestion plus efficace et durable de cette maladie dévastatrice, contribuant ainsi à la préservation de l'agriculture et de l'environnement.

3. Liste des livrables du projet acquis pendant la recherche

[Description des livrables, conditions d'accessibilité, lien vers la ressource, mode d'emploi, ...](#)

Liste des livrables du projet acquis pendant la recherche intitulé "Conception et validation d'un modèle de prévision et d'avertissement des maladies fongiques de la betterave avec étude des résistances et d'application des principes de la lutte intégrée (phase 2)"

1. Modèle de Simulation de la Cercosporiose (2021)

- Développement d'un modèle de simulation pour prédire les infections par la cercosporiose.
- Validation du modèle via la plateforme AgrOptimize, basé sur des données collectées de 2018 à 2020 sur 13 sites différents.
- Performances du modèle évaluées avec des valeurs de POD, CSI et FAR respectivement $\geq 84\%$, $\geq 78\%$ et $\leq 15\%$.

2. Rapport d'Évaluation et Validation (2021)

- Compilation des résultats de l'évaluation du modèle de simulation.
- Analyse de la concordance entre les prédictions du modèle et les événements d'infection réels.
- Documentation des performances des trois modèles testés (M1, M2, M3).

3. Résolutions Techniques et Ajustements du Modèle (2022)

- Identification et résolution des incohérences entre les simulations et les observations de terrain.
- Propositions d'ajustements tels que la prise en compte des courbes d'incubation et l'encodage manuel de la date de fermeture des lignes.

4. Étude des Facteurs Météorologiques Affectant l'Oïdium (2023)

- Recherche approfondie sur les conditions météorologiques favorisant l'oïdium.
- Développement d'un module spécifique pour la simulation de l'oïdium, malgré sa faible incidence en 2021.

5. Rapports Annuels de Suivi et d'Essais sur le Terrain (2021-2023)

- Documentation des essais menés sur différents sites chaque année (4 sites en 2021, 4 en 2022, et 4 en 2023).
- Analyse de l'incidence de la cercosporiose sur les témoins non traités et des variations annuelles de la pression de la maladie.
- Évaluation de la santé foliaire et du rendement en fonction des traitements appliqués.

6. Résultats du Réseau Pilote (2021-2023)

- Test du modèle sur un réseau de champs (43 champs en 2021, 23 en 2022, et 18 en 2023).
- Analyse de la pertinence des premières alertes du modèle par rapport aux conditions réelles de terrain.

7. Synthèse des Performances et Recommandations (2023)

- Compilation des résultats de l'efficacité du modèle de simulation sur trois ans.
- Confirmation de l'alignement des alertes initiales avec celles de l'IRBAB dans 61 % des cas en 2023.
- Recommandations pour l'évaluation future du modèle dans des conditions climatiques variées.

8. Publications et Présentations Scientifiques

- Articles et rapports publiés détaillant les méthodes, résultats et implications des recherches.
- Présentations lors de conférences et séminaires pour partager les découvertes avec la communauté scientifique et les agriculteurs.

9. Outil d'Aide à la Décision pour les Agriculteurs

- Développement d'un outil pratique basé sur le modèle de simulation pour guider les agriculteurs dans leurs choix de traitement.
- Mise à disposition des résultats et des recommandations via des plateformes accessibles aux agriculteurs.

10. Rapport Final du Projet (2024)

- Documentation complète des activités, résultats et impacts du projet D65-1408.
- Analyse finale des performances du modèle et de son application pratique pour la gestion de la cercosporiose.

4. Vulgarisation

Liste des actions de vulgarisation entreprises dans le cadre du projet D65-1408 (2021-2024)

1. Projets de Développement

- **Développement d'une Plateforme de Suivi en Ligne**
- Création et perfectionnement d'un système en ligne pour le suivi du modèle de simulation de la cercosporiose, permettant aux agriculteurs de consulter les prévisions en temps réel et d'ajuster leurs interventions en conséquence.
- **Intégration de Nouveaux Outils Météorologiques**
- Amélioration du modèle en intégrant des données météorologiques précises et en temps réel, cruciales pour des prédictions fiables et l'efficacité du modèle de simulation.

2. Formation des Acteurs d'Encadrement

- **Ateliers de Formation pour les Techniciens et Conseillers Agricoles**
- Organisation d'ateliers pratiques pour former les techniciens et conseillers agricoles à l'utilisation du modèle de simulation et des outils de suivi en ligne. Ces formations ont couvert l'interprétation des données de simulation, les paramètres météorologiques influençant la cercosporiose et l'oïdium, ainsi que les stratégies de lutte intégrée.
- **Sessions de Formation sur les Principes de la Lutte Intégrée**
- Sessions de formation pour les acteurs du secteur agricole sur les principes de la lutte intégrée, soulignant l'importance de réduire l'utilisation de produits phytosanitaires tout en maintenant l'efficacité des traitements contre les maladies fongiques.

3. Communications vers le Secteur

- **Publications et Rapports Techniques**
- Publication de rapports annuels détaillant les progrès du projet, les résultats des essais, et les performances du modèle de simulation. Ces rapports ont été diffusés auprès des agriculteurs, des chercheurs, et des décideurs politiques.
- **Articles dans des Revues Agricoles et Bulletins Techniques**
 - Rédaction d'articles dans des revues agricoles spécialisées et des bulletins techniques de l'IRBAB pour informer les agriculteurs des nouvelles avancées et des bonnes pratiques pour la gestion de la cercosporiose et de l'oïdium.
- **Conférences et Séminaires**
 - Présentation des résultats du projet lors de conférences et séminaires nationaux et internationaux pour partager les découvertes avec la communauté scientifique et le secteur agricole.
- **Journées Portes Ouvertes et Démonstrations sur le Terrain**
 - Organisation de journées portes ouvertes et de démonstrations sur le terrain pour montrer aux agriculteurs les outils de simulation en action, et discuter des meilleures pratiques pour la gestion des maladies fongiques.
- **Webinaires et Séances d'Information en Ligne**
 - Réalisation de webinaires pour atteindre un public plus large, fournissant des informations sur le fonctionnement du modèle de simulation, les résultats des essais, et les recommandations pour les interventions en temps réel.

4. Collaboration et Partenariats

- **Collaboration avec des Institutions de Recherche**

- Collaboration continue avec l'Université de Liège et d'autres instituts de recherche pour affiner le modèle de simulation et intégrer les dernières avancées scientifiques dans les outils de prévision.
- **Partenariat avec des Organisations Agricoles et des Coopératives**
 - Partenariat avec des organisations agricoles et des coopératives pour assurer la diffusion des outils de simulation et des résultats de recherche auprès des agriculteurs membres.

5. Évaluation et Retour d'Expérience

- **Enquêtes et Retours des Agriculteurs**
 - Conduite d'enquêtes régulières auprès des agriculteurs utilisant le modèle de simulation pour recueillir leurs retours et suggestions d'amélioration.
- **Rapports de Suivi et d'Évaluation**
 - Élaboration de rapports de suivi et d'évaluation pour mesurer l'impact des actions de vulgarisation et adapter les stratégies en fonction des besoins et des retours du terrain.

Ces actions de vulgarisation ont été cruciales pour assurer que les avancées scientifiques et techniques du projet D65-1408 soient accessibles et utilisables par les agriculteurs, contribuant ainsi à une gestion plus efficace et durable des maladies fongiques de la betterave sucrière.

5. Brevets - Publications

[Références des brevets en préparation / déposés / étendus...](#)

[Références des communications scientifiques écrites \(articles, poster...\) ou orales \(congrès...\)](#)

1- Moussa El Jarroudi, Fadia Chairi, Louis Kouadio, Kathleen Antoons, Abdoul-Hamid Mohamed Sallah, and Xavier Fettweis. 2021. Weather-Based Predictive Modeling of Cercospora beticola Infection Events in Sugar Beet in Belgium. J. Fungi 2021, 7(9), 777; <https://doi.org/10.3390/jof7090777>

2- Moussa El Jarroudi, Fadia Chairi, Louis Kouadio, Kathleen Antoons, Abdoul-Hamid Mohamed Sallah, Bernard Tychon, and Xavier Fettweis. A prediction model of Cercospora beticola disease of sugar beet in Belgium. Poster presentation for the 78th IIRB Congress 2022. 21st to 23rd June 2022 at the Wallonia Conference Center in Mons.

6. Perspectives de valorisation

[Situation par rapport aux perspectives initiales \(décrites dans la convention\)](#)

[Evolutions / modifications compte tenu des résultats acquis pendant le projet.](#)

Les perspectives de valorisation sont en concordance avec les perspectives initiales qui ont été décrites dans le programme.

Perspectives de Valorisation du Projet de Recherche D65-1408

1. Amélioration Continue du Modèle de Simulation

• Affinement des Paramètres Météorologiques

- Intégration de nouvelles sources de données météorologiques et amélioration de la résolution des prévisions pour augmenter la précision du modèle.
- Développement de collaborations avec des services météorologiques nationaux et internationaux pour obtenir des données de haute qualité et en temps réel.

• Optimisation des Algorithmes de Simulation

- Incorporation de techniques avancées d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour améliorer la précision des prévisions et des alertes.
- Mise à jour régulière des modèles en fonction des nouvelles découvertes scientifiques et des retours des utilisateurs.

2. Expansion Géographique et Adaptation Locale

• Élargissement de la Couverture du Modèle

- Adaptation du modèle pour une utilisation dans différentes régions productrices de betteraves sucrières à travers l'Europe et potentiellement à l'échelle mondiale.
- Personnalisation des modèles pour tenir compte des spécificités climatiques et agricoles de chaque région.

• Collaboration avec des Institutions Internationales

- Partenariats avec des universités et des instituts de recherche dans d'autres pays pour valider et adapter le modèle à des contextes locaux variés.
- Participation à des projets de recherche internationaux sur la gestion des maladies fongiques des cultures.

3. Développement de Nouveaux Outils et Applications

• Applications Mobiles et Outils de Gestion Agricole

- Développement d'applications mobiles permettant aux agriculteurs d'accéder facilement aux prévisions et aux alertes de maladies fongiques.
- Intégration du modèle dans des plateformes de gestion agricole existantes pour offrir une solution tout-en-un aux agriculteurs.

• Outils de Décision pour la Lutte Intégrée

- Élaboration d'outils décisionnels intégrés qui non seulement préviennent les agriculteurs des risques de maladies fongiques, mais suggèrent également des stratégies de lutte intégrée spécifiques en fonction des prévisions.
- Mise en place de systèmes de recommandation basés sur les données historiques et les tendances actuelles pour optimiser les traitements phytosanitaires.

4. Formation et Sensibilisation

• Programmes de Formation Continue

- Développement de modules de formation en ligne et de cours en présentiel pour former les agriculteurs, les techniciens agricoles et les conseillers en agriculture sur l'utilisation du modèle et les pratiques de lutte intégrée.
- Organisation de séminaires et d'ateliers réguliers pour partager les mises à jour du modèle et les nouvelles pratiques agricoles.

• Campagnes de Sensibilisation

- Lancement de campagnes de sensibilisation pour informer les agriculteurs des avantages économiques et environnementaux de l'utilisation du modèle de simulation.
- Collaboration avec les médias agricoles pour diffuser des informations sur les réussites et les meilleures pratiques issues du projet.

5. Impacts Économiques et Environnementaux

• Réduction des Coûts Agricoles

- Valorisation du projet en démontrant comment l'utilisation du modèle permet de réduire les coûts liés aux traitements phytosanitaires grâce à une gestion plus précise et efficace des interventions.
- Promotion des économies réalisées par les agriculteurs ayant adopté le modèle, en termes de réduction des intrants et d'optimisation des rendements.

• Promotion de l'Agriculture Durable

- Mise en avant des bénéfices environnementaux du modèle, tels que la réduction de l'utilisation de produits chimiques, la protection de la biodiversité et l'amélioration de la qualité des sols et de l'eau.
- Soutien à des politiques agricoles durables en collaborant avec les autorités publiques pour intégrer le modèle dans les stratégies nationales et régionales de gestion des cultures.

6. Extension à d'Autres Cultures

• Adaptation du Modèle à D'autres Cultures

- Exploration de l'application du modèle à d'autres cultures sensibles aux maladies fongiques.
- Réalisation d'études pilotes pour évaluer l'efficacité du modèle sur ces cultures et adapter les algorithmes en conséquence.

• Diversification des Solutions de Prédiction

- Développement de modules spécifiques pour d'autres pathogènes fongiques en utilisant l'approche et les méthodologies validées par le projet D65-1408.
- Élargissement de la base de données de maladies et des outils de simulation pour couvrir une gamme plus large de défis phytosanitaires dans l'agriculture.

En synthèse, la valorisation du projet D65-1408 repose sur l'amélioration continue du modèle, son expansion géographique, le développement de nouveaux outils, la formation et la sensibilisation des acteurs, ainsi que sur l'impact économique et environnemental positif pour l'agriculture. La diversification vers d'autres cultures et la collaboration internationale joueront également un rôle crucial dans la pérennisation et l'extension des bénéfices de ce projet.

7. Problèmes rencontrés et actions correctives éventuellement prises

Synthétiser les problèmes d'ordre technique / scientifique mais aussi organisationnels (calendrier) / managériaux que vous avez rencontrés au cours de l'entièreté de la recherche, ainsi que les solutions apportées pour y remédier.

Problèmes Rencontrés et Actions Correctives du Projet D65-1408

1. Problèmes Techniques et de Données

- **Incohérences dans les Données Météorologiques (2022)**

- **Problème** : Des incohérences ont été observées entre les simulations et les observations de terrain, principalement dues à des problèmes de serveur et de génération de données météorologiques erronées.
- **Action Corrective** : Amélioration de la fiabilité des données météorologiques en renforçant les partenariats avec des fournisseurs de données météorologiques de haute précision et en intégrant des systèmes de backup pour éviter les interruptions de service. Des validations croisées des données ont été mises en place pour garantir leur exactitude avant utilisation dans les simulations.

- **Problèmes de Serveur**

- **Problème** : Pannes de serveur et interruptions de service qui ont entraîné des retards et des incohérences dans la génération des prévisions.
- **Action Corrective** : Mise à niveau de l'infrastructure informatique avec des serveurs plus robustes et redondants, et mise en place de protocoles de surveillance en temps réel pour détecter et résoudre rapidement les problèmes techniques.

2. Problèmes Liés à la Modélisation et aux Algorithmes

- **Défauts de Modélisation (2021-2022)**

- **Problème** : Les performances des modèles (M1, M2, M3) ont été affectées par des limitations dans la prise en compte des courbes d'incubation et des délais de rémanence des traitements.
- **Action Corrective** : Révision des algorithmes de modélisation pour intégrer les courbes d'incubation dès la deuxième semaine de rémanence des traitements, et amélioration des algorithmes pour une meilleure prise en compte des paramètres dynamiques.

- **Précision des Simulations**

- **Problème** : En 2022, des écarts significatifs ont été notés entre les prévisions du modèle et les observations de terrain, ce qui a impacté la confiance des utilisateurs.
- **Action Corrective** : Raffinement des paramètres de modélisation et ajustement des seuils de déclenchement des alertes. Des tests plus rigoureux ont été effectués en conditions réelles pour valider les ajustements effectués.

3. Problèmes de Communication et d'Implémentation

- **Délais dans la Diffusion des Alertes**

- **Problème** : Des délais dans la diffusion des alertes initiales ont été observés, entraînant des écarts de 9 à 10 jours dans certains cas.
- **Action Corrective** : Amélioration des protocoles de communication pour garantir une diffusion plus rapide et synchronisée des alertes. Adoption d'un système de notifications en temps réel via des applications mobiles pour assurer une réception immédiate des alertes par les agriculteurs.

- **Formation et Adoption des Outils**

- **Problème** : Les agriculteurs et les conseillers techniques ont parfois rencontré des difficultés à utiliser les outils de modélisation en raison d'un manque de formation adéquate.
- **Action Corrective** : Organisation de sessions de formation intensives et continues pour les utilisateurs finaux, y compris des ateliers pratiques et des modules de formation en ligne. Développement de guides d'utilisation détaillés et de vidéos tutoriels pour faciliter l'adoption des outils.

4. Problèmes Climatologiques

- **Variabilité Climatique**

- **Problème** : Les conditions climatiques variées, comme les étés humides en 2023, ont entraîné des différences significatives dans la pression de la cercosporiose et ont affecté les performances du modèle.
- **Action Corrective** : Ajustement du modèle pour mieux s'adapter aux variations climatiques annuelles. Inclusion de scénarios climatiques diversifiés dans les simulations pour prévoir et gérer les différentes conditions climatiques.

5. Problèmes Liés aux Essais sur le Terrain

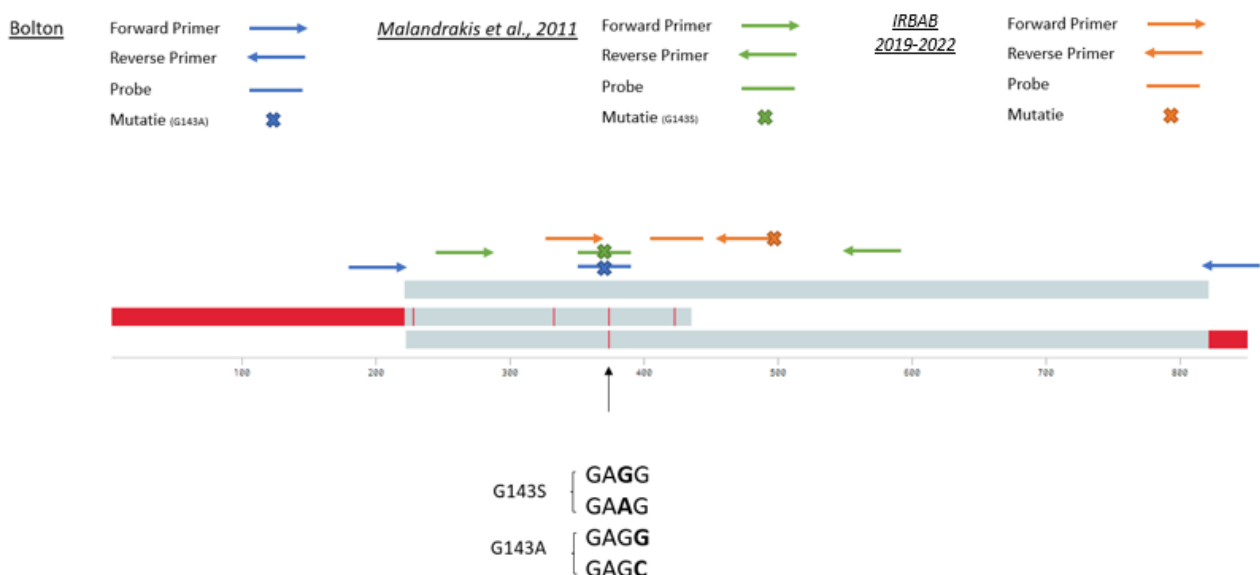
- **Conditions Climatiques Impactant les Essais**

- **Problème** : Les essais de terrain n'ont pas toujours pu être réalisés comme prévu en raison de conditions climatiques défavorables (pluie, vent).

- **Action Corrective** : Flexibilisation des protocoles d'essai pour permettre des ajustements en fonction des conditions météorologiques. Mise en place de sites d'essais supplémentaires pour garantir la continuité des recherches malgré les aléas climatiques.
- **Incidence Variable de la Cercosporiose**
 - **Problème** : La pression de la cercosporiose a varié d'une année à l'autre, compliquant l'évaluation uniforme du modèle.
 - **Action Corrective** : Collecte de données sur plusieurs années et sur un plus grand nombre de sites pour obtenir une base de données plus robuste et représentative. Analyse statistique avancée pour normaliser les résultats et identifier les tendances indépendantes des variations annuelles.
- **6. Problèmes Liés à l'analyse de résistance**
 - **Problème** :
 - **Analyses moléculaires**

Des analyses qPCR sur les résistances DMI et QOI ont été réalisées sur des échantillons prélevés de 2019 à 2022. Après avoir vérifié ces analyses, il s'avère qu'il y a quelques erreurs. Pour cette raison, des contacts ont été pris en France (Ann-Sophie Walker) et en Amérique (M. Bolton) qui ont confirmé les erreurs probables. Cela amène à la conclusion que les résultats qui ont été présentés précédemment peuvent être erronés et que les analyses doivent être refaites et améliorées.

- **Résistance QOI**



Plusieurs questions se posent avec les amorces et la sonde utilisées précédemment. Des amorces ont été utilisées pour détecter la mutation, ce qui est inhabituel. La sonde utilisée est une sonde universelle, qui ne détecte pas une mutation, ce qui est encore une fois inhabituel. Ce faisant, la bonne mutation ponctuelle n'a peut-être pas été détectée. Les amorces et la sonde correctes seront commandées et testées.

- Résistance DMI

La résistance au DMI n'est pas une mutation ponctuelle, le mécanisme de résistance est plus complexe et plusieurs mutations peuvent en être responsables.

Des contacts ont été pris avec l'Allemagne (IFZ-Mark Varrelman) et la France (Ann-Sophie Walker), qui testent la résistance au DMI selon la méthode EC50, qui est basée sur l'excroissance de cercospora sur des plaques de gélose traitées avec un fongicide.

- Cela ne nous est pas utile puisque nos échantillons sont tous de l'ADN et non plus des isolats.

Une deuxième façon de détecter cela consiste à utiliser plusieurs sondes. Des sondes ont été commandées selon l'article de M. Bolton, mais elles ne fonctionnent pas comme elles le devraient. La question a été posée à Mr Bolton et il nous a informé que nous ne sommes pas sûrs d'avoir la même mutation. Une collaboration est envisagée avec Mr Bolton pour voir où se trouvent les mutations qui sont responsables de la résistance. Pour cela, des isolats de l'IFZ qui ont été sélectionnés en fonction de la valeur EC50 seront utilisés. Étant donné qu'aucune amorce ni sonde n'est encore connue pour la résistance au DMI en Europe, cela pourrait devenir une collaboration importante.

- Rotorods

Plusieurs échantillons de rotorod ont été prélevés en 2020 à 2022. Avant que ceux-ci soient analysés, il doit d'abord y avoir un protocole de travail. L'optimisation du protocole a été effectuée à l'aide de rotorods dopés avec un nombre connu de spores.

La détection de traces pose de nombreux problèmes. La détection des traces se fait via un protocole développé par le Prof. dr. Varrelmann en Allemagne. Après avoir copié exactement le protocole, nous n'obtenons aucune détection via la qPCR. Cela peut être dû à l'extraction de l'ADN, mais aussi aux amorces et à la sonde elle-même. Plusieurs méthodes d'extraction ont été réalisées sans détection avec qPCR (annexe 5).

Il existe des échantillons de rotor en verre disponibles qui peuvent être visualisés au microscope. Sur celui-ci, 2 spores ont été trouvés visuellement, ce qui veut dire qu'il faut avoir une limite de détection qPCR de 1 spore par échantillon. La limite de détection de la qPCR selon le Pr Varrelmann est de 22. Cela peut signifier qu'aucune détection de cercospora sur les rotorods n'est possible, malgré le fait que les spores sont présentes en faible quantité. Suite au contact avec Mr Varrelmann, nous avons appris que nous utilisons la mauvaise méthode d'échantillonnage. Du ruban adhésif double face a été utilisé mais celui-ci perd rapidement ses propriétés collantes. Il a été conseillé de traiter les rotorods avec une vaseline sous forme de spray, ce qui fonctionne parfaitement pour les expériences du professeur Varrelmann. Cela sera appliqué aux rotorods qui seront placés en 2023.

Afin de parvenir à solutionner ces différents problèmes, une formation sera suivie par Isabelle Stockmans à l'IFZ du 17 au 21 juillet.

- **Action Corrective** : Flexibilisation des protocoles d'essai pour permettre des ajustements en fonction des conditions météorologiques. Mise en place de sites d'essais supplémentaires pour garantir la continuité des recherches malgré les aléas climatiques.

Conclusion

Les actions correctives prises tout au long du projet D65-1408 ont permis de surmonter les divers problèmes techniques, de modélisation, de communication et climatiques rencontrés. Ces ajustements ont non seulement amélioré la fiabilité et l'efficacité du modèle de prévision, mais ont également renforcé la confiance des utilisateurs finaux dans les outils développés. La flexibilité et l'adaptabilité des protocoles de recherche ont été cruciales pour assurer le succès du projet et sa pérennité future.