

BILAN DES RECHERCHES MENEES SUR LE MILDIU DE LA POMME DE TERRE AU COURS DES ANNEES 2000 à 2005

J.L. Rolot¹, D. Michelante², B. Dupuis¹

¹ Section Systèmes agricoles, Libramont

² Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire, AFSCA

1. Introduction.

Le mildiou de la pomme de terre demeure un sujet d'actualité pour tout le secteur de la pomme de terre. Depuis quelques années maintenant, les informations convergentes désignant une agressivité accrue de la maladie sont recueillies à travers le monde entier. En Belgique et en Wallonie en particulier, les producteurs mais aussi les chercheurs et services d'encadrement de la profession ont pu noter cet état de fait à travers des apparitions plus précoces de la maladie, un développement particulièrement vigoureux de l'épidémie et, en définitive, la difficulté accrue de maintenir les parcelles de pommes de terre indemnes de mildiou. De l'avis de nombreux chercheurs, cette évolution résulte d'une introduction en Europe de souches nouvelles via l'importation de pommes de terre d'Amérique centrale (Mexique) consécutivement à l'été sec et chaud de 1976. Ces nouvelles souches, plus compétitives que les populations existantes en Europe depuis des dizaines d'années, les ont progressivement remplacées. Ces importations auraient en outre permis l'introduction en Europe d'une souche (A2) capable d'opérer une reproduction sexuée avec la souche (A1) se multipliant traditionnellement de manière asexuée ou clonale en Europe. Cette situation aurait alors considérablement augmenté la diversité génétique des populations européennes entraînant, plus qu'auparavant, une meilleure aptitude de ces populations à contourner les pratiques de lutte mises en œuvre par l'homme.

La Section Systèmes agricoles de Libramont a depuis longtemps étudié les méthodes permettant d'améliorer la lutte contre cette maladie, notamment en élaborant un système capable d'identifier, lors de la saison de culture, les périodes les plus favorables pour les infections ainsi que celles où la fructification des infections fait peser un lourd danger pour les cultures en végétation. C'est en effet juste avant la fructification des infections développées dans le feuillage que l'efficacité des traitements de protection est optimale. Au cours des dernières années, la Section a développé plusieurs recherches visant notamment à mieux caractériser les populations présentes sur notre territoire de manière à rendre plus performant le système d'aide à la décision mis en place dans les années 70, c'est à dire avant le bouleversement intervenu au sein des populations de mildiou en Europe. Elle a également participé, avec d'autres partenaires, à l'évaluation du comportement des variétés face au mildiou de manière à affiner les décisions de traitement issues de l'application du modèle. Enfin, elle contribue à identifier, pour l'agriculture biologique, des nouvelles pratiques de protection ou culturales visant à réduire l'impact de la maladie, notamment, dans le cadre du projet Interreg VETAB (Valoriser l'Expérience Transfrontalière en Agriculture Biologique), les études concernant les alternatives à l'utilisation du Cuivre.

L'exposé présenté ici aborde les 3 premiers points de ces études, le système d'avertissement, les études de population et les études concernant le comportement des variétés.

2. Le système d'avertissement et la pression du mildiou au cours de ces 6 dernières années.

2.1 Généralités.

Les avertissements mildiou de la pomme de terre ont été mis en place dans les années '70 par l'ex Station de Haute Belgique. Ils étaient alors limités aux régions du Sud du Pays (Ardenne et Gaume) et fonctionnaient sur un mode manuel fort contraignant en terme de rapidité de décision (stations d'observation manuelles). Ensuite, fin des années '80, début des années '90, un subside européen (programme de développement intégré – PDI) a permis l'installation d'un réseau automatisé de stations météorologiques dans le Sud de la Wallonie (Ardenne et Gaume) : le gain de temps obtenu grâce à l'informatisation des bases de données météo et des procédures de calcul du modèle épidémiologique permettait alors de réagir pratiquement instantanément et en tous les cas d'obtenir une vue quotidienne de la situation « mildiou ». Dans les années '90, le programme européen 2078/92 a permis de généraliser le système à l'ensemble du pays. Le modèle épidémiologique « Guntz et Divoux » à la base de ce système a alors été diffusé auprès des services agronomiques du CARAH (Hainaut) et du PCA (Flandre). Le réseau automatisé de stations agro-météorologiques de l'ASBL PAMESEB (Promotion de l'Agrométéorologie dans le Sud Est Belge) a été étendu à l'ensemble de la région wallonne ; il compte actuellement 34 stations météorologiques dont une trentaine sont utilisées pour l'avertissement « mildiou ». Actuellement ce réseau est en passe d'être complètement renouvelé grâce à l'appui de la Direction Générale de l'Agriculture.

Pour élaborer les avis, le prescripteur analyse les résultats calculés par le modèle, les observations biologiques assurées sur le terrain avec l'aide de la Direction du Développement de la Direction générale de l'Agriculture tout en prenant en compte les données relatives aux résistances variétales et aux caractéristiques des différents fongicides. En fonction de la demande, les avis sont diffusés par courrier conventionnel, fax, répondeur téléphonique ou e-mail.

La prochaine étape de développement consistera vraisemblablement en une automatisation encore plus poussée de la gestion des informations permettant la prise en compte des situations particulières jusqu'au niveau de la parcelle. On se propose de mettre en place un Système d'Aide à la Décision (SAD) en ligne basé sur le réseau Internet au niveau duquel le producteur possèdera un rôle prépondérant et pouvant ainsi recevoir une information adaptée à sa propre situation.

2.2 Les avertissements diffusés en 2005 et analyse sur les 6 dernières années.

2.2.1 La pression de la maladie au cours de la saison 2005.

Du point de vue « mildiou », la saison de culture 2005 peut être caractérisée comme suit :

- la possibilité de présence du mildiou dans les tubercules de semence étant donné une forte pression durant l'année précédente,
- une plantation généralement retardée (début mai) étant donné les mauvaises conditions climatiques du début du printemps 2005,

- des observations précoces de mildiou sur tas d'écartis de triage, dès le 29 avril dans le Hainaut, la Flandre et le Nord de la France, des observations fréquentes de mildiou sur tas et dans les repousses fin mai dans le Hainaut,
- une fin de mois de mai et les 25 premiers jours de juin secs, climat défavorable aux contaminations et même assainissant pour l'environnement (repousses et tas de déchets),
- un retour des pluies et des périodes de contamination dès la fin juin,
- un mois de juillet présentant 4 cycles d'infections potentielles à 7 jours ou moins d'intervalle (30 juin et 1^{er} juillet, 7-8 juillet, 10-12-13-14 juillet, 20 juillet, 25-26-28 juillet), déterminant fin juillet le seuil épidémique de la maladie (observation du mildiou en parcelles de production de manière éparses),
- un mois d'août très favorable au développement de l'épidémie au cours duquel les cycles d'infection se succèdent à des intervalles réduits de 4 à 5 jours (30-31 juillet et 1^{er} août, 5-6 et 7 août, 12-14 et 15 août, 19-20 et 21 août, 23 et 25 août) avec comme résultante une présence du mildiou dans les parcelles de production dans toutes les régions de Wallonie et une réelle difficulté à s'en défaire,
- enfin un mois de septembre peu propice au développement des infections quoique favorable à l'entretien du mildiou du fait de l'humidité des matinées.

Le tableau 1 résume les avis et conseils de traitement issus du modèle Guntz et Divoux de Libramont.

Tableau 1. Service d'avertissements de Libramont – Conseils de traitement en 2005.

Avis n°	Date Conseil de traitement	Type s.a	Région	Type variété	Commentaires
1	-	-	-	-	Avis général, situation de début de saison, principes de lutte
2	29 mai	Contact	Nord*	S, MS**	Traitement préventif sur cultures non protégées en raison de la présence de nombreux foyers en Hainaut.
3	5 juin	Contact ou Systémique	Nord	S, MS	Protection contre fructification de l'infection potentielle des 29 et 30 mai. Traitement à appliquer en fonction de l'environnement des parcelles.
4	12 juin	Contact	Nord, Sud	S, MS	Protection contre fructification de l'infection potentielle des 4 et 6 juin. Climat peu favorable au développement de la maladie
5	29 juin	Systémique	Sud	S, MS	Protection contre fructification de l'infection potentielle à caractère très grave des 25 et 26 juin
6	4 juillet	Systémique	Nord	S, MS	Protection contre fructification de l'infection potentielle à caractère très grave du 29 et 30 juin. Peu de risques étant donné la période sèche précédente. Reprise de croissance suite à la période sèche. Temps chaud et humide.
7	10 juillet	Contact ou pénétrant	Sud	S, MS	Pluies lessivantes, protection contre la fructification de l'infection potentielle des 5, et 6 juillet. Le Nord reste protégé par le traitement du 4 juillet.
8	12 juillet	Systémique	Nord	Toutes variétés	Protection contre la fructification de l'infection potentielle à caractère très grave des 7 et 8 juillet. Temps chaud, humide et poussant
9	20 juillet	Contact avec protection des tubercules	Nord, Sud	Toutes variétés	Protection contre la fructification des infections potentielles à caractère léger des 13, 14, 15 juillet (brouillards matinaux) à condition que le temps redevienne humide. Temps chaud et sec peu favorable.

Avis n°	Date Conseil de traitement	Type s.a	Région	Type variété	Commentaires
10	28 juillet	Résistance au lessivage et protection des tubercules. A action éradicante si présence de mildiou dans la parcelle	Nord, Sud	Toutes variétés	Protection contre les infections potentielles à caractère grave des 22, 24 et 25 juillet. Reprise des symptômes sur tas et repousses. Premières observations de mildiou en parcelles de production.
11	3 août	Résistance au lessivage et protection des tubercules	Sud	Toutes variétés	Protection contre les infections potentielles à caractère grave observées fin juillet en Gaume et Ardenne (précipitations importantes). Au Nord, pas de précipitations importantes.
12	4 août	Résistance au lessivage et protection des tubercules. A action éradicante si présence de mildiou dans la parcelle	Nord	Toutes variétés	Protection contre les infections potentielles de fin juillet, début août. Les observations de mildiou dans les parcelles montrent que la phase épidémique est atteinte.
13	11 août	Idem	Nord, Sud	Toutes variétés	Protection contre la fructification des infections potentielles à caractère très grave des 5, 6, 7 août
14	18 août	Idem	Nord, Sud	Toutes variétés	Protection contre la fructification des infections potentielles des 12, 14 et 15 août. Les cycles d'infections se succèdent à intervalles rapprochés
15	24 août	Idem	Nord, Sud	Toutes variétés	Protection contre la fructification des infections potentielles des 19, 20 et 21 août
16	31 août	Idem	Nord, Sud	Toutes variétés	Protection contre la fructification des infections potentielles des 23 et 25 août
17	10 septembre	Idem	Nord, Sud	Toutes variétés	Protection contre la fructification des infections potentielles créées à la faveur de l'humidité matinale. Retour des pluies annoncé pour le 10/11 septembre.
18	21 septembre	Idem	Nord, Sud	Toutes variétés	Protection contre la fructification des infections potentielles créées à la faveur de l'humidité matinale.

- *: le Nord correspond aux postes météo situé au Nord du Sillon Sambre et Meuse.
- **: variétés sensibles (S) à moyennement sensibles (MS)

En résumé donc :

- 13 traitements de protection ont été conseillés au Nord du Sillon Sambre et Meuse,
- 11 traitements de protection ont été conseillés au Sud du Sillon Sambre et Meuse,
- 13 traitements de protection ont été recommandés pour les variétés sensibles à moyennement sensibles,
- 9 traitements de protection ont été recommandés pour les variétés possédant un bon niveau de résistance.

2.2.2 Facteurs de l'épidémie limitant la marge de manœuvre en matière d'avertissements.

Les points faibles en matière de contrôle du mildiou demeurent :

- La présence de tas de déchets (écarts de triage) abandonnés par les producteurs ci et là dans la nature. On peut considérer que ces tas se trouvent à l'origine de l'épidémie chaque

année et qu'ils impliquent, de la part des services d'avertissement, des conseils de traitement très tôt en saison qui, dans le cas d'une bonne gestion de ces tas, ne se justifieraient probablement pas.

- Les repousses dans les parcelles ayant porté de la pomme de terre l'année précédente. Les repousses issues de tubercules abandonnés sur le sol lors des opérations de récolte (bien souvent des tubercules dont le calibre n'offre pas de débouché commercial) constituent un autre point faible favorisant grandement l'épidémie. Une diminution de la pression du mildiou sur les parcelles de production, donc du niveau d'intensité de la lutte, passera nécessairement par une gestion efficace de ces repousses. Etant donné la difficulté de se défaire des repousses par un simple contrôle chimique, c'est un ensemble de mesures qui devront être développées incluant aussi bien les pratiques culturales (labour/non labour après récolte, dimension des mailles des tapis sur arracheuses, rotations avec plantes assainissantes,...) que le contrôle chimique (herbicides spécifiques, utilisation d'anti-germinatifs en végétation,...). Ne pas oublier non plus qu'en laissant les choses en l'état, la présence permanente de repousses induit pratiquement une absence de rotation et réalise donc un entretien des maladies spécifiques de la pomme de terre hypothéquant l'avenir de la culture dans la région (viroses, nématodes, bactéries, rhizoctone,...).
- Les variétés : une grande majorité des variétés cultivées dans notre région sont sensibles au mildiou (Bintje, Charlotte, Agata, Eerstelling, Ukama, Première, Lady Christl, Nicola, Felsina...). Ces variétés sont si sensibles qu'elles n'autorisent aucune prise de risque au niveau des Services d'avertissement. Par contre nous avons montré qu'une réduction de l'intensité de la lutte (réduction du nombre de traitements) est possible dans le cas de l'utilisation de variétés plus tolérantes comme Remarka, Naturella, Gasore, Eden,.... Malheureusement, les variétés plus résistantes sont aussi souvent celles trouvant plus difficilement place dans le commerce en raison de qualités d'utilisation bien souvent insuffisantes.

2.2.3 Bilan sur les 6 dernières années.

Nous présentons dans le tableau suivant un résumé de la pression d'infection par le mildiou et le nombre de traitements préconisés au cours de ces 6 dernières années dans le cadre du Service d'avertissements de Libramont.

Tableau 2. *Situation résumée de la pression d'infection et des avis au cours des années 2000 à 2005 (région de Sombreffe/Eghezée, variété sensible de type Bintje).*

Année	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPT	1 ^{er} symptômes sur tas/repousses	1 ^{er} symptômes en culture	Nbre de traitements
2000	****	***	****	***	****	15 mai	11 juin	15
2001	*	*	****	**	****	15 mai	10 juillet	14
2002	****	****	****	****	*	2 mai	15 juin	16
2003	**	***	*	-	**	16 mai	3 juin	11
2004	**	****	****	****	-	10 mai	21 juin	15
2005	-	*	****	****	***	3 juin	19 juillet	13

- très faible (Risques cumulés < 5) ; * faible (5,1<Rcum<10) ; ** moyenne (10,1<Rcum<14) ; *** forte (14,1<Rcum<25) ; **** très forte (25,1<Rcum)

Malgré la prudence nécessaire optée par le Service d'avertissement pour la rédaction de ses avis (environnement des parcelles généralement contaminé et variétés utilisées fort sensibles), on constate qu'il joue pleinement son rôle lors des années à moindre pression : à ce moment (2003 et 2005, dans une moindre mesure 2001), l'analyse de la situation à travers le modèle ainsi que les observations biologiques de terrain permettent une réduction significative du nombre de traitements appliqués si on compare les résultats du modèle sur ce point à ceux qui pourraient être issus de l'application d'un schéma systématique de traitements (en moyenne, un traitement/semaine, 125 jours de végétation, soit 18 semaines pour une variété de type Bintje).

3. Caractérisation des populations de mildiou en Wallonie.

3.1 Introduction.

Le champignon *Phytophthora infestans* présente deux types sexuels compatibles dénommés A1 et A2. En absence de l'un ou l'autre type, le champignon ne peut se multiplier que de manière asexuée. Du fait de la faible variation génétique des populations multipliées de cette manière, les stratégies de lutte établies par l'homme possèdent un effet plus ou moins durable, le contrôle du champignon étant dès lors plus efficace : dans ce cas, l'apparition de résistances aux fongicides est moins fréquente, l'efficacité des gènes spécifiques de résistance aux différentes races est plus durable et justifie mieux leur utilisation dans les programmes de sélection. Cette situation a prévalu en Europe jusqu'au début des années '80, période avant laquelle seul le type sexuel A1 était présent. La présence simultanée des deux types sexuels n'était alors connue qu'au Mexique. Toutefois, à partir des années '80 et surtout au cours des années '90, l'observation, en Europe, d'un accroissement sensible de la sévérité et de l'agressivité de la maladie a mené les chercheurs à s'interroger sur les causes de ce phénomène. Une des explications probable, et depuis confirmée par des études sur les populations indigènes, est l'introduction en Europe de la souche sexuellement compatible (A2) avec la souche A1 existante. La possibilité, pour le champignon, de se reproduire sexuellement ouvrait alors la porte à des variations de structure génétique des populations plus importantes et par conséquent la capacité accrue des nouvelles populations de contourner plus facilement les stratégies de lutte mises au point par l'homme.

A Libramont, des études de populations ont été entreprises fin des années '90, début des années 2000 afin d'évaluer le comportement de ces populations dans le cadre d'une mise à jour du système d'avertissement.

Des échantillons de mildiou ont été prélevés sur l'ensemble du territoire wallon au cours de la période 1999-2004. Après isolement et mise en culture, les isolats obtenus ont été caractérisés pour le type sexuel (A1 ou A2), pour la résistance au métalaxyl, pour le profil de virulence et pour l'agressivité.

3.2 Type sexuel.

La détermination du type sexuel est effectuée par confrontation en boîte de Pétri sur milieu Agar V8 clarifié de la souche à tester avec des souches de référence A1 et A2. L'observation de la production ou non d'oospores (organe attestant le croisement sexué) sur la zone de convergence des mycéliums permet de déterminer le type sexuel. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant : ils montrent que la présence du type A2 compatible sexuellement

avec le type A1 traditionnel ne doit pas être négligée dans notre région et peut être à l'origine d'une agressivité plus importante des populations.

Tableau 3. Occurrence des souches A2 dans les populations de mildiou en Wallonie.

Année	Nombre d'isolats testés	Fréquence de la souche A2 (%)
1999	67	17
2000	85	18
2001	108	20
2002	32	3
2003	14	57
2004	12	33

3.3 Résistance au métalaxyl .

La résistance au métalaxyl, substance active du Ridomil, fongicide systémique de choix dans l'arsenal phytopharmaceutique, est un critère permettant de caractériser les populations et elle constitue aussi une information intéressante pour l'établissement des stratégies de lutte chimique efficaces à l'égard du champignon. Grâce sa capacité à être transloqué à travers la plante entière (système) pour une protection optimale contre les infections, le métalaxyl est une molécule fort intéressante pour la lutte contre le mildiou : cependant, en raison de son mode d'action fort précis (unisélectif), sa propension à sélectionner, au sein des populations de mildiou, des individus résistants à son action est bien connue. Aussi, les informations concernant la capacité des populations à résister à l'action du métalaxyl sont utiles si l'on veut utiliser cette substance active à bon escient et éviter les accidents en cours de culture.

La mesure du comportement des isolats collectés en Wallonie s'effectue sur des disques foliaires de la variété Bintje mis en flottaison sur 5 solutions de métalaxyl (Ridomil WP25) dont les concentrations sont connues et varient de 0 à 100 ppm . Sur chaque disque foliaire est déposée une goutte contenant une suspension l'isolat à tester. L'observation des lésions développées par l'isolat est effectuée après 7 jours d'incubation (18°C, photopériode 16h) : l'EC50 (concentration de métalaxyl assurant 50% de protection) est déterminée et les isolats sont classés « sensibles » si $EC_{50} < 0,01 \text{ ppm}$, « intermédiaires » si $0,01 \text{ ppm} < EC_{50} < 10 \text{ ppm}$, « résistants » si 50% de protection n'est pas assurée dans des solutions dépassant une concentration de 10ppm en métalaxyl.

Le tableau suivant présente les résultats obtenus au cours de la période 1999-2004. On peut remarquer que le nombre d'isolats sensibles au métalaxyl reste relativement constant d'une année à l'autre (une vingtaine de pourcent), mais aussi que ce groupe représente une minorité des isolats testés. Cette observation indique clairement le danger que constitue une utilisation non réfléchie de ce produit. C'est la raison pour laquelle il est fortement recommandé de ne réserver le Ridomil qu'à des usages précis (en croissance végétative et uniquement lorsque les conditions climatiques ne permettent pas l'usage de produits de contact classiques ou une application en temps requis) et, en tous les cas, de ne pas répéter son application plus de deux fois au cours de la saison pour éviter la sélection de souches résistantes dans l'environnement.

Tableau 4. Classes de sensibilité au métalaxyl des isolats prélevés en Wallonie au cours de la période 1999-2004.

Année	Classes de sensibilité			Nombre isolats testés
	Résistant (%)	Intermédiaire (%)	Sensible (%)	
1999	28	61	11	61
2000	41	32	27	37
2001	18	66	16	49
2002	19	65	16	31
2003	33	42	57	12
2004	0	100	0	5

3.4 Le profil de virulence.

La recherche de gènes majeurs de résistance au mildiou pour leur introduction dans les variétés cultivées par hybridation classique fut fortement développée par le passé. Ces gènes de résistance ont généralement été identifiés dans des solanacées sauvages dont *Solanum demissum* est le représentant le plus illustre pour cette caractéristique. 11 gènes majeurs (R1 à R11) sont aujourd'hui identifiés ; il en existe vraisemblablement d'autres. Après l'introduction de ces gènes dans les variétés commerciales, on a toutefois constaté assez rapidement que le champignon était capable de contourner ces résistances et d'infecter malgré tout les plantes. Ces nouvelles souches de mildiou (appelées races physiologiques ou virulentes R1, R2,...) sont capables d'infecter respectivement les variétés porteuses des gènes majeurs de résistance R1, R2,... C'est le principe même de fonctionnement de la résistance dite verticale susceptible de s'écrouler rapidement une fois que la race physiologique capable de l'attaquer est sélectionnée dans l'environnement. On préfère aujourd'hui à cette résistance verticale, la résistance horizontale ou résistance au champ contrôlée de manière polygénique par différents gènes mineurs qui, individuellement, ne procurent aucune résistance mais dont l'action « collégiale » au sein de la plante permet de ralentir la progression de la maladie, rendant ainsi la plante plus tolérante à l'infection.

Quoiqu'il en soit, ces gènes majeurs sont toujours utilisés aujourd'hui pour caractériser les populations de mildiou dans un environnement donné.

Le profil de virulence des isolats est donc déterminé en testant la relation de compatibilité pathogène (isolat) – hôte (plante) sur une collection de 11 clones portant chacun un gène majeur de résistance déterminé. Les clones sont connus et maintenus *in vitro* au laboratoire de Libramont et sont disponibles chaque fois que nécessaire. Les clones sont cultivés en serre en conditions contrôlées de manière à obtenir des folioles sur lesquelles le test est alors réalisé en laboratoire par le dépôt d'une gouttelette contenant en suspension l'isolat à tester, et en plaçant ensuite la foliole ainsi traitée dans un incubateur (18°C, photopériode 16h) : la lecture de la réaction a lieu une semaine plus tard.

Les profils de virulence des isolats testés sont présentés dans le tableau suivant. On constate que les isolats avec un profil de virulence complexe, c'est à dire qui peuvent contourner plus

de 5 gènes de résistance en une fois, sont les plus nombreux. Le profil de virulence le plus commun est 1.3.4.7.10.11.

Tableau 5. *Profils de virulence observés sur les isolats de mildiou collectés entre 1999 et 2004.*

Année	Virulence des isolats			Nombre d'isolats testés
	Isolats avec 5 virulences ou plus (%)	Gènes R contournés rarement	Gènes R jamais contournés	
1999	72	R8, R5, R6, R2	R9	12
2000	92	R8, R5, R6, R2	R9	85
2001	81	R8, R5, R6, R2	R9	50
2002	81	R8	R2, R5, R6, R9	16
2003	-	-	-	0
2004	85	R5	R2, R6, R8, R9	7

Le gène majeur de résistance jamais contourné est R9 tandis que les gènes R2, R5, R6 et R8 sont plus rarement contournés par les populations de mildiou présentes en Wallonie.

3.5 L'agressivité.

L'agressivité du pathogène se traduit par son aptitude à coloniser plus ou moins rapidement les tissus sains de l'hôte compatible. L'agressivité peut être scindée en 4 composantes : la fréquence d'infection FI (% de contaminations réussies), la période de latence PL10 (temps entre l'infection et 10% de sporulation), la vitesse de croissance des lésions CLmax sur la feuille testée et l'intensité de la sporulation PS (quantité de sporanges produites par la lésion). Le test se réalise en laboratoire sur des feuilles entières de la variété Bintje prélevées sur les étages intermédiaires de plantes élevées en serre ; une micro-goutelette contenant en suspension des sporanges à concentration déterminée (1×10^4 sporanges/ml) de l'isolat à tester est déposée sur chacune des folioles composant la feuille ; la feuille ainsi traitée est placée en incubation (18°C, photopériode de 16h) et observée à 3, 4, 5, 6 et 7 jours.

FI correspond donc au pourcentage de sites d'inoculation qui ont développé des lésions après 7 jours d'incubation. PL10 correspond au nombre d'heures, après inoculation, nécessaires pour que 10% des contaminations sporulent. Clmax est la pente au point d'inflexion de la courbe ajustée (vitesse de croissance). PS est le logarithme naturel du nombre de sporanges par cm^2 mesuré.

Un index global d'agressivité peut alors être calculé selon la formule :

$$IA = 1 / PL10 * FI * Clmax * PS$$

Le graphique suivant montre la distribution des indices d'agressivité obtenus suite à l'examen de 56 isolats en 2000 et 2001. Entre les années 2000 et 2001, aucune différence significative n'a été observée dans le comportement des populations pour ce caractère. Un intérêt évident

ici reposerait plutôt dans l'étude de l'évolution de l'agressivité des populations pour des intervalles de temps plus importants.

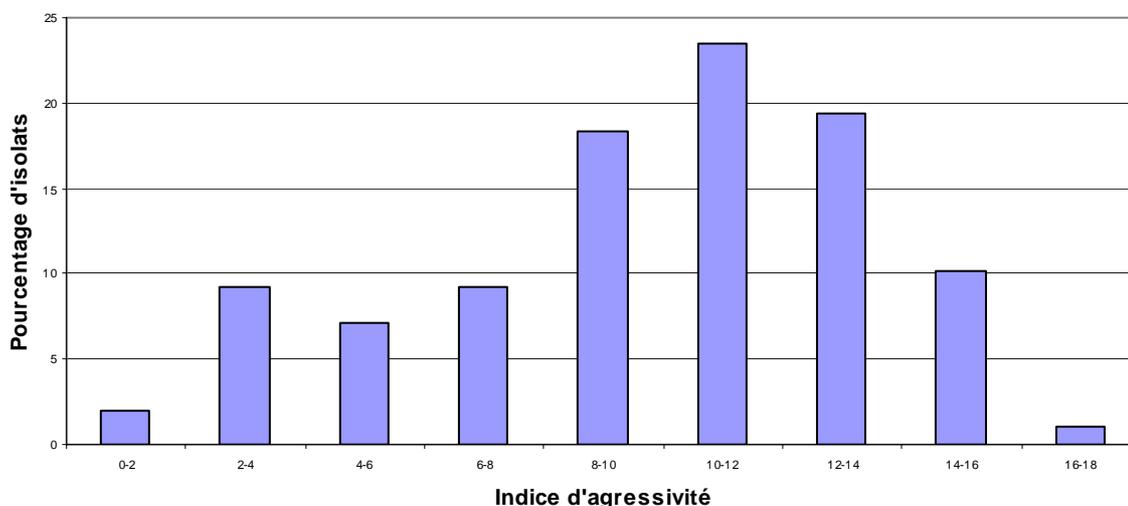


Figure 1. *Distribution de l'indice d'agressivité pour les isolats 2000 et 2001*

L'étude de l'indice d'agressivité a cependant permis de montrer l'existence d'isolats capables de réaliser un cycle complet « infection-fructification » en moins de 66h à 18°C alors que le modèle de simulation du cycle utilisé par le service d'avertissement prend en compte, à cette température, une valeur moyenne pour la période de latence de 84h. La figure suivante montre que 28% des isolats testés possèdent une période de latence inférieure à cette valeur ; c'est d'ailleurs la raison pour laquelle les valeurs d'incubation ont été légèrement modifiées dans le modèle de manière à prendre en compte ces observations.

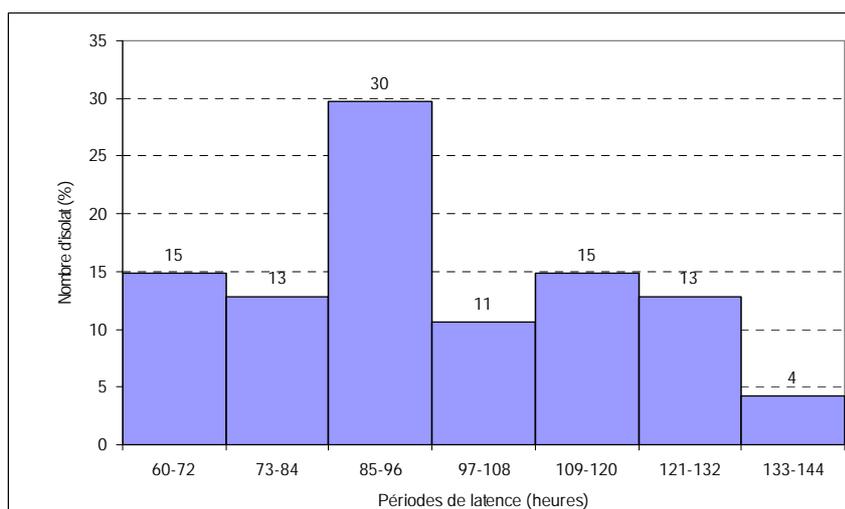


Figure 2. *Distribution des fréquences pour la période de latence des isolats observés à 18°C en 2000 et 2001*

4. Etude du comportement des variétés au champ.

4.1. Les principaux types de comportement.

Dans un premier temps, le modèle de développement de l'épidémie de mildiou et les décisions de traitements ont été calibrés sur le comportement de la variété sensible « Bintje ». Pour adapter le rythme des traitements, généralement soutenu pour les variétés sensibles, et éventuellement permettre une économie complémentaire de traitements sur les variétés plus résistantes ou plus tolérantes, les études de comportement des variétés au champ sont utiles.

La mesure du développement de l'infection dans le feuillage s'effectue généralement dans des dispositifs expérimentaux non traités. Les notations s'effectuent en observant la date d'apparition des premiers symptômes sur le feuillage et ensuite, à intervalles réguliers, en mesurant la destruction du feuillage selon une échelle de notation déterminée (par exemple, l'échelle USAID).

La figure suivante représente l'évolution de la destruction du feuillage de 3 variétés possédant un comportement typique à ce niveau. L'une, la variété sensible Bintje est rapidement attaquée et, une fois le mildiou présent, la vitesse de son développement dans le feuillage (cinétique de destruction) est très rapide : c'est le comportement typique des variétés ne possédant pas de facteurs de résistance au mildiou. La deuxième, variété Agria, présente les premiers symptômes d'attaque quasiment au même moment, mais ensuite, la cinétique de destruction est beaucoup plus lente : c'est le comportement typique de variétés possédant une certaine tolérance ou résistance au champ guidée par l'action d'un complexe de gènes mineurs déterminant une résistance de type horizontale. Les premiers symptômes observés dans la troisième, variété Innovator, sont plus tardifs, mais une fois installé, le mildiou y progresse de manière très rapide si bien qu'en bout de course, la destruction est pratiquement équivalente à celle de la variété sensible Bintje : c'est le comportement typique de variétés possédant un ou plusieurs gènes majeurs de résistance déterminant une résistance de type verticale. Ces derniers sont efficaces jusqu'à ce que la pression de sélection que ces variétés opèrent sur les populations de mildiou aboutisse à la sélection d'une race physiologique capable de contourner la résistance. Une fois cette race sélectionnée, il n'y a alors plus aucun obstacle à son action, la plante est rapidement détruite.

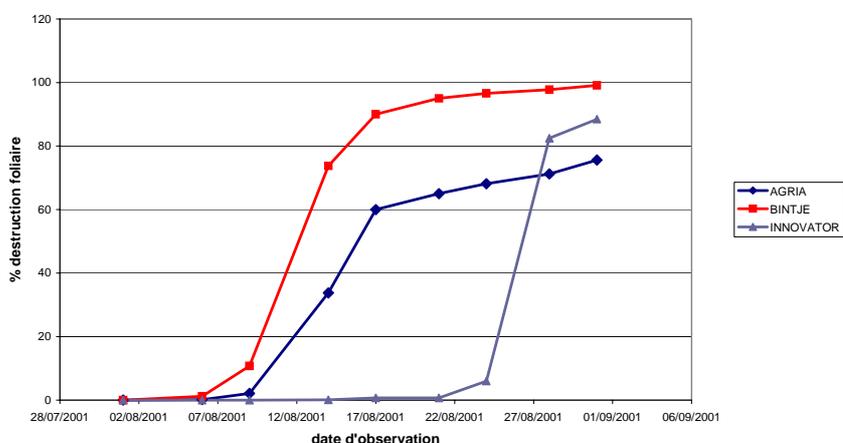


Figure 3. Cinétique de destruction foliaire pour 3 variétés développant un mécanisme de résistance au mildiou différent.

Ces comportements différents peuvent induire des stratégies de lutte spécifiques. Si le premier laisse peu de liberté en matière de protection (la lutte doit débiter dès que la quantité d'inoculum dans l'environnement est capable de réaliser une infection générale des cultures, soit à partir de la 3^e génération de mildiou détectée par le modèle après l'observation des symptômes sur les tas de déchets), les deux suivantes permettent d'envisager une certaine réduction de l'intensité de la lutte. En espaçant les traitements ou en réduisant les quantités de substances actives utilisées par traitement (variétés tolérantes de type Agria) ou en retardant l'application des premiers traitements, procurant de ce fait une économie de une à trois interventions au début de la saison (variétés possédant des gènes majeurs de résistance).

4.2. Essais de comportement réalisés par la Section Systèmes agricoles.

Des essais visant à caractériser un groupe de variétés par rapport à ces comportements ont été réalisés à Gembloux et Libramont au cours des années 2001 à 2004.

Les variétés testées sont :

Bintje, en tant que matériel de référence ne possédant pas de résistance, Marfona, Exempla, Raja, Désirée, Santana, Agria, Remarka, Charlotte, Juliette, Markies, Eden, Innovator, Druid, Gasore et Ramos.

Les variétés sont implantées dans des micro-parcelles de deux rangs de 5 ou 10 touffes. Chacune des micro-parcelles est séparée de la suivante par un rang-tampon de la variété Gasore, variété très résistante, de manière à réduire les interactions entre parcelles voisines. Les deux rangs constituant la variété à tester sont bordés de part et d'autre de 2 plantes infectantes d'une variété sensible (Bintje) de manière à favoriser une contamination uniforme sur l'essai. L'essai est chaque fois implanté selon un dispositif en 4 blocs aléatoires complets. L'essai n'est pas protégé.

La date d'apparition des premiers symptômes est notée et ensuite, deux fois par semaine, le taux de destruction du feuillage est observé et noté selon l'échelle de notation USAID.

Au terme de l'essai, le comportement de chacune des variétés est visualisé par rapport à la variété de référence Bintje dans un graphique dont l'axe des ordonnées représente le retard dans la destruction du feuillage d'une variété donnée par rapport à Bintje (référence = temps nécessaire pour atteindre 50% de destruction) et l'axe des abscisses représentant la différence de vitesse de développement de la maladie par rapport à Bintje. La variété Bintje quant à elle est située au point d'intersection des deux axes.

Les variétés situées à droite de l'axe des ordonnées sont celles pour lesquelles la destruction du feuillage est plus rapide que celle observée pour la variété Bintje : c'est le signe de la présence éventuelle d'une résistance contrôlée par un ou des gènes majeurs (résistance verticale), signe d'autant plus évident si la position de la variété dans le graphique est élevée (retard de l'infection par rapport à celle observée sur Bintje). Les variétés situées à gauche de l'axe des ordonnées sont celles pour lesquelles la destruction du feuillage est plus lente que celle observée pour la variété Bintje : cela pourrait être le signe d'une résistance au champ plus stable que la précédente (résistance horizontale). Selon leur position en hauteur sur le graphique, les variétés accusent un retard plus ou moins prononcé à être détruites par rapport à Bintje (référence = 50% du feuillage détruit). En terme d'efficacité, les variétés situées en haut à gauche de l'axe des ordonnées seraient évidemment les plus intéressantes parce que l'on pourrait envisager avec elles une réduction du nombre de traitements en retardant la

première protection, et peut être aussi une réduction de l'intensité de la protection en baissant les doses appliquées par unité de surface ou en espaçant les traitements.

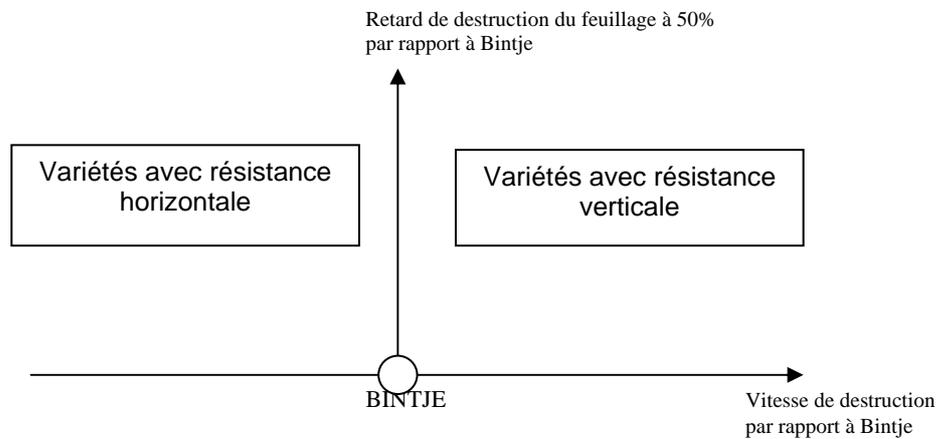
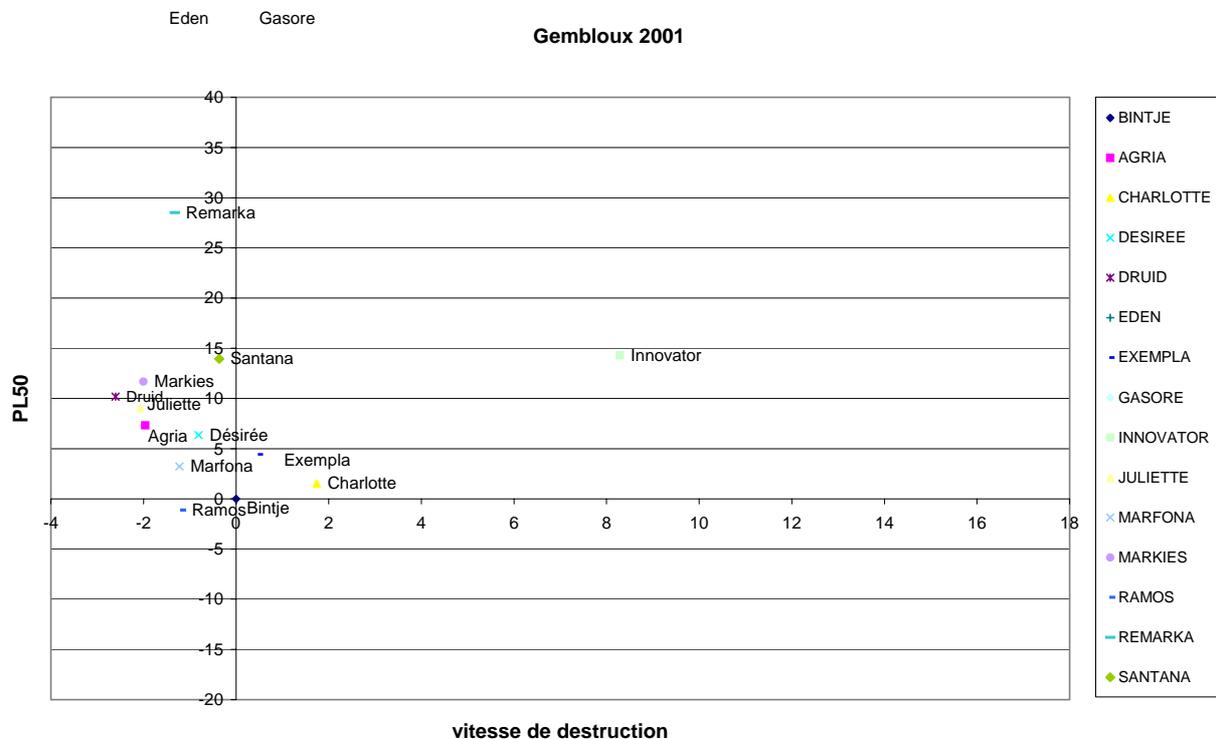
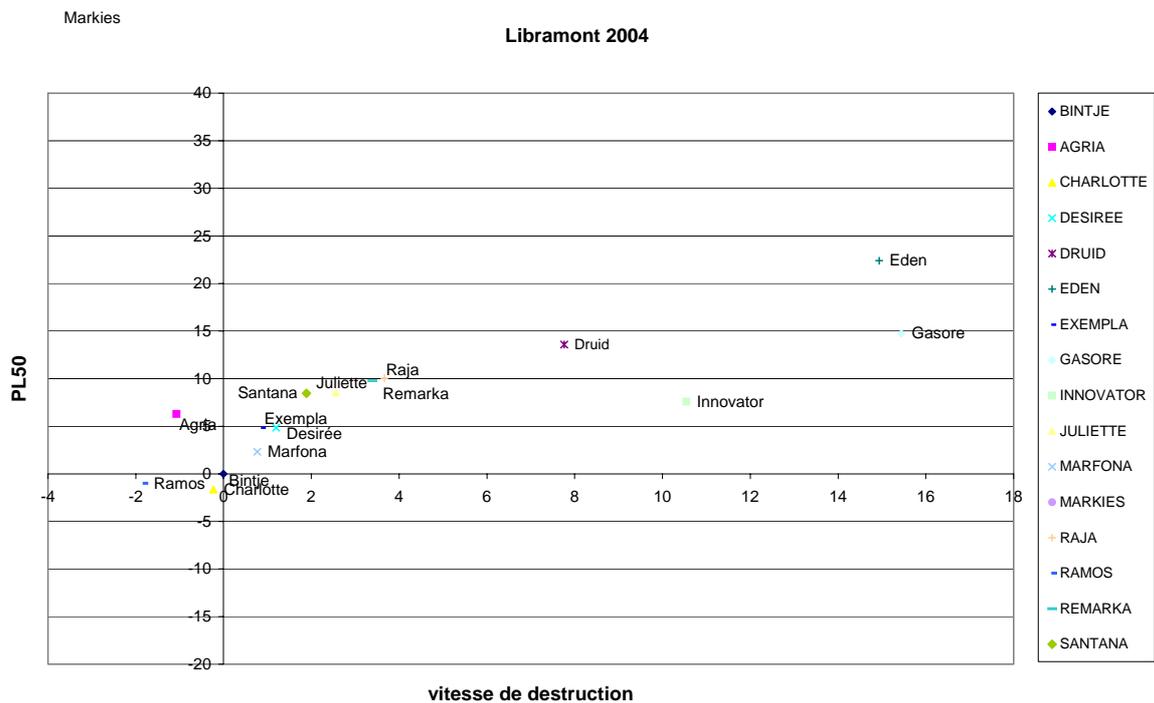
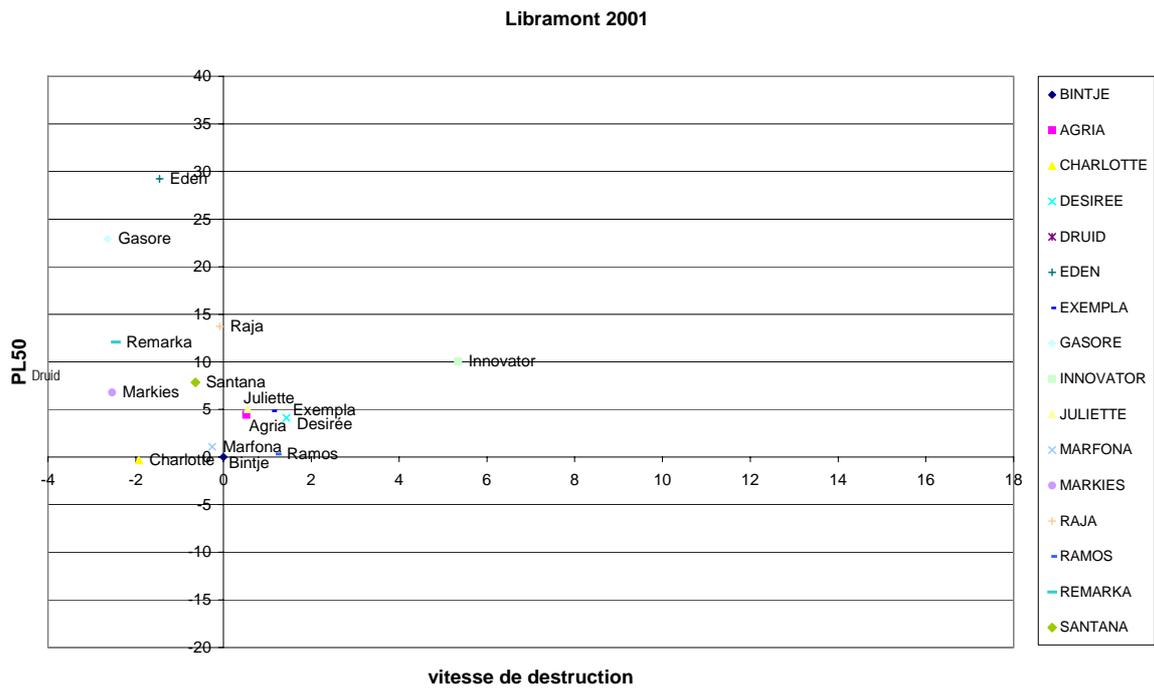


Figure 4. Interprétation à donner à la figure 5.

Les figures suivantes visualisent les résultats obtenus des différents essais menés à Gembloux (2001) et Libramont (2001, 2004)

Figure 5. Comportement d'un set de variétés cultivées en Belgique (Gembloux et Libramont 2001 et 2004).





La lecture de ces graphiques nous révèle un comportement très contrasté selon l'année pour certaines variétés. C'est le cas pour les variétés Edén, Gasore, Druid qui, en 2001, ont montré une résistance à l'infection remarquable aussi bien à Libramont qu'à Gembloux et qui, en 2004 par contre, une fois infectées, ont vu leur résistance s'écrouler avec une vitesse de progression de l'infection supérieure à celle observée pour Bintje. En 2004 donc, elles ont extériorisé le comportement typique de variétés à résistance verticale qu'elles n'ont pas

développé en 2001, vraisemblablement parce que les races physiologiques capables de contourner leur résistance n'avaient pas été sélectionnées dans leur environnement immédiat. Le cas de la variété Innovator est beaucoup plus clair et représente bien le comportement d'une variété possédant des gènes majeurs de résistance procurant la résistance verticale (un certain délai par rapport à la destruction 50%, une vitesse élevée de destruction une fois l'infection réalisée).

Dans un autre groupe contenant les variétés Remarka, Santana, Juliette, Raja, Exempla et Désirée, le temps nécessaire à l'établissement de la maladie sur 50% du feuillage est significativement plus long que celui observé sur la variété Bintje, mais la progression de l'infection dans le feuillage peut être équivalente sinon plus rapide que pour Bintje. Cette dernière observation peut cependant aussi être attribuée à la pression générale régnant sur l'essai pouvant être importante à partir du moment où le mildiou se déclare un peu partout : dès cet instant, la résistance à la progression de l'infection, même sur des variétés moins sensibles, peut être modifiée. D'où la difficulté, dans ce genre d'essai, de mesurer le comportement d'une variété sans perturbations induites par celui d'autres plus sensibles.

Deux variétés possédant des caractéristiques intéressantes surtout au niveau de la vitesse de progression de l'infection : Markies et Agria.

Un groupe de variétés possédant un comportement sensiblement équivalent à Bintje : Charlotte, Ramos et Marfona.

D'une manière générale donc, cette étude a permis de montrer que certaines variétés renseignées comme résistantes à très résistantes au mildiou comportent souvent le risque d'écroulement de la résistance (Innovator, Gasore, Eden, Druid). Pour autant que les populations de mildiou capables de contourner leur résistance ne soient pas actives dès l'entame de la saison, ces variétés conservent toutefois un intérêt car elles permettent de faire l'impasse sur les deux ou trois premières protection en saison. Plus tard en saison, leur protection devient tout aussi indispensable que celle exigée par les variétés sensibles. Du point de vue de la durabilité de la résistance dans la saison mais aussi sur un plus long terme, des variétés comme Agria et Markies semblent plus intéressantes. Elles permettent l'impasse sur un ou deux traitements de protection en début de saison et pourraient, peut être aussi, supporter sans conséquence fâcheuse des stratégies de traitement moins intensives comme l'espacement des traitements ou la réduction de doses dans certaines conditions (à vérifier). En ce qui concerne l'ensemble des variétés du groupe de Remarka, une analyse plus fine mériterait d'être exécutée en dehors des influences, dans les essais, des variétés sensibles. Pour les autres variétés (Charlotte, Ramos, Marfona) aucune latitude n'est permise, ces variétés possédant un comportement très proche de Bintje.

Références bibliographiques.

HAINÉ D., 2001. Etude de l'incidence de nouvelles populations de *Phytophthora infestans* et de la résistance variétale sur le développement de l'infection en vue d'améliorer le modèle Guntz et Divoux – 1^{er} rapport de synthèse, 31/08/2001, Convention N°S-6005, Ministère des Classes moyennes et de l'Agriculture, Direction générale Recherche et Développement – Section Systèmes agricoles, CRA Libramont.

HAINÉ D., 2002. Etude de l'incidence de nouvelles populations de *Phytophthora infestans* et de la résistance variétale sur le développement de l'infection en vue d'améliorer le modèle Guntz et Divoux – 2^e rapport de synthèse, 28/08/2002, Convention N°S-6005, Ministère des Classes moyennes et de l'Agriculture, Direction générale Recherche et Développement – Section Systèmes agricoles, CRA Libramont.

HAINÉ D., 2003. Etude de l'incidence de nouvelles populations de *Phytophthora infestans* et de la résistance variétale sur le développement de l'infection en vue d'améliorer le modèle Guntz et Divoux – 1^{er} rapport de synthèse, 31/10/2003, Convention N°RW-1016, Ministère de la Région wallonne, Direction générale de l'Agriculture – Section Systèmes agricoles, CRA Libramont.

HAINÉ D., 2004. Etude de l'incidence de nouvelles populations de *Phytophthora infestans* et de la résistance variétale sur le développement de l'infection en vue d'améliorer le modèle Guntz et Divoux – 2^e rapport de synthèse, 01/12/2004, Convention N°RW-1016, Ministère de la Région wallonne, Direction générale de l'Agriculture – Section Systèmes agricoles, CRA Libramont.

MICHELANTE D., CODRON N., HAINÉ D., SERVAIS L., SEUTIN H., 2004. Essais de stratégies de lutte contre le mildiou de la pomme de terre en agriculture biologique : alternatives aux fongicides cupriques – Avertissements, résistance variétale, prégermination (Libramont 2004) – Rapport d'expérimentation, projet VETAB. Section Systèmes agricoles, CRA Libramont.

MICHELANTE D., HAINÉ D., SERVAIS L., SEUTIN H., 2004. Sensibilité des variétés au mildiou du feuillage, 2004. Rapport d'expérimentation, projet VETAB. Section Systèmes agricoles, CRA Libramont.

MICHELANTE D., 2004. Lutte raisonnée contre le mildiou : validation du système d'avertissements et adaptation du modèle Guntz et Divoux à la résistance variétale, Libramont 2004. Rapport d'expérimentation. Section Systèmes agricoles, CRA Libramont.

MICHELANTE D., CODRON ., HAINÉ D., SERVAIS L., 2004. Criblage au laboratoire de produits de remplacement du cuivre pour la lutte contre le mildiou en agriculture biologique, Libramont 2002-2004. Rapport d'expérimentation. Section Systèmes agricoles, CRA Libramont.

MICHELANTE D., LABBE V., GARCIA N., MAHIN D., SERVAIS L., 2005. Essai d'agressivité des isolats en fonction de la concentration de l'inoculum et de son mode de culture. Rapport d'expérimentation. Section Systèmes agricoles, CRA Libramont.

DANGL J.L., JONES J.D., 2001. Potato Genome Project, Potato biology, Diseases. Nature 411, 826-833 (2001).

FOUAD D., PLATT H.W., 1999. Assessment of Mating Types and Resistance to Metalaxyl of Canadian Populations of *Phytophthora infestans* in 1997. Amer J of Potato Res (1999) 76 : 287-295.

DAVIDSE L.C., LOOIJEN D., TURKENSTEEN L.J., VAN DER WAL D., 1981. Occurrence of metalaxyl resistant strains of *Phytophthora infestans* in Dutch potato fields. Neth J Plant Pathol 87 : 717-725.

DOWLEY L.J., O'SULLIVAN E., 1981. Metalaxyl-resistant strains of *Phytophthora infestans* (Mont.) De Bary in Ireland. Potato Res 24 :417-421.

FRY W.E., GOODWIN S.B., 1997. Re-emergence of potato and tomato late blight in the United States. Plant Dis 81 :1349-1357.

GOODWIN S.B., COHEN B.A., DEAHL K.L., FRY W.E., 1994a. Migration from Northern Mexico as the probable cause of recent genetic changes in populations of *Phytophthora infestans* in the United States and Canada. Phytopathology 84 : 553-558.

HOHL H.R., ISELIN K., 1984. Strains of *Phytophthora infestans* from Switzerland with A2 mating type behaviour. Trans Br Mycol Soc 83 : 529-530.

PETERS R.D., FORSTER H., PLATT H.W., HALL R., COFFEY M.D., 2001. Novel genotypes of *Phytophthora infestans* in Canada during 1994 and 1995. Amer J of Potato Res (2001) 78 :39-45

FRY W.E., GOODWIN S.B., DYER A.T., 1993. Historical and recent migrations of *Phytophthora infestans* : chronology, pathways and implications. Plant Dis 77 : 653-661.

SUJKOWSKI L.S., GOODWIN S.B., DYER A.T., FRY W.E., 1994. Increased genotypic diversity via migration and possible occurrence of sexual reproduction of *Phytophthora infestans* in Poland. Phytopathology 84 :201-207.

ANDRIVON D., LEBRETON L., LAURENT C., DUVAUCHELLE S., 1998. *Phytophthora infestans* : des populations en évolution. Phytoma-La défense des Végétaux-n°502-Février 1998.

DUVAUCHELLE S., EMERY D., LHERBIER V., ANDRIVON D., LEBRETON L., SARNIGUET C., 1998. Enquête sur les souches de mildiou : résistance au métalaxyl et présence des souches A1 et A2. Phytoma – La Défense des Végétaux – n° 502 – Février 1998.