



STATION EXPÉRIMENTALE
FRUITS & LÉGUMES
LANGUEDOC ROUSSILLON

**Contribution à la protection intégrée du verger de pommier :
réduction de l'inoculum primaire de tavelure,
Venturia inaequalis (Cke) Wint. par pulvérisation d'urée**

CRETE Xavier



Juillet 2007

« ...Ces actions techniques visent une limitation de la dispersion des pesticides dans l'environnement et une réduction de l'usage des pesticides. On considère classiquement que ce second objectif peut être poursuivi : en « raisonnant » l'application de ces produits, et/ou en appliquant une combinaison de méthodes de lutte à effets partiels, qualifiées d'«alternatives», en complément ou en remplacement des méthodes chimiques habituelles. »

Aubertot *et al.*, 2005.

Extrait de la synthèse du rapport d'expertise scientifique collective INRA/Cemagref (p13) :
« Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux.»

« ...Thus, after the leaf abscission, the fate of the fungus, in these regions is determined mainly in the next two or four weeks, for that is when mating occurs and pseudothecia form. Considering that (i) this is such a vulnerable period in the life of this fungus, (ii) dead scabbed leaves are the main or sole source of primary inoculum, (iii) many cations, salts, and buffers can inhibit the sexual phase of *V. inaequalis*, and (iv) these inorganic chemicals would likely be less harmful to the environment and nontarget organisms than organic fungicides used to manage scab, it is surprising that so little attention has been given to establishing efficacy and developing tactics for these substance in scab management.»

William E. MacHardy

Extrait de « Apple scab. Biology, Epidémiology and Management » APS press. 1996.

Table des sigles et abréviations :

ANP : Anilinopyrimidines
APS : American Phytopathology Society
AUDPC : Area Under the Disease Progress Curve
BCMA: Bureau de Coordination du Machinisme Agricole
BRM : Comité de Bassin Rhône Méditerranée (fruits et légumes)
CA : Chambre d'Agriculture.
CEHM : Centre Expérimental Horticole de Marsillargues
CEMAGREF : Centre Machinisme Agricole et Génie Rural Eaux et Forêts
CIREA : Centre Inter-régional d'Expérimentation Arboricole
C/N : Rapport carbone sur azote
Comm. pers. : Communication personnelle
Ctifl : Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes
Cv. : Cultivar
DGAL : Direction Générale de l'ALimentation
et al. : *et alii* (et autres auteurs)
HR : humidité relative (ou **RH** : Relative humidity)
IBS : Inhibiteurs de la Biosynthèse des Stérols
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
mm : Millimètre
Mo. : *Microspaeopsis ochracea*
Obs. pers. : Observation personnelle
PAD : Potential Ascospore Dose
pH : Potentiel Hydrogène
RIM : Relative Infection Measure
SDQPV : Sous-Direction de la Qualité et la Protection des Végétaux
SRPV : Service Régional de Protection des Végétaux
UA : Urée à l'Automne (pulvérisations sur la frondaison)
UP : Urée au Printemps (pulvérisation de la litière, au sol)

Introduction

Le pommier est l'une des espèces fruitières les plus cultivées dans le monde. Pour la France, parmi les tous premiers producteurs et exportateurs mondiaux, l'importance de cette culture est majeure.

Depuis les années 1970, les exigences commerciales en matière d'aspect du fruit, ont entraîné une progression importante de l'utilisation de produits de phyto-protection (Aubertot, *et al.*, 2005). Malgré des efforts importants de la filière pour mettre en place des démarches de protection raisonnée depuis une dizaine d'années, la profession est aujourd'hui confrontée à des problèmes techniques importants avec l'apparition de résistance de plusieurs phyto-agresseurs aux grandes familles de substances actives.

Ceci est notamment le cas pour la tavelure du pommier, mais aussi le carpocapse ou les acariens rouges. Dans tous ces cas, la mauvaise ou la sur-utilisation des pesticides est en grande partie à l'origine d'impasses techniques qui parfois remettent en cause la culture elle-même.

La tavelure, principale maladie du pommier par sa gravité, est aussi celle qui exige le plus de traitements phytosanitaires.

Depuis plusieurs années en Languedoc, mais aussi dans les autres régions de production, les cas d'échec de protection contre la tavelure sont en augmentation. L'évolution du choix variétal n'est sans doute pas étrangère à cette situation puisqu'en effet, la grande majorité des cultivars récents sont très sensibles à cette maladie. Si la piste génétique permet d'envisager des solutions à moyen terme, à ce jour, le choix parmi les cultivars résistants disponibles est sans doute encore trop limité. Par ailleurs, les cultivars résistants à la tavelure disponibles à ce jour présentent une résistance à caractère monogénique qui en hypothèque les perspectives de développement à long terme.

Dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, la très grande confiance dans la lutte chimique a fait considérer la prophylaxie comme une technique d'une efficacité trop limitée pour justifier le coût de sa mise en œuvre. Aujourd'hui, face à l'apparition de résistances des bio-agresseurs et, dans certain cas, à l'impasse technique qui en résulte, le principe de la prophylaxie commence à devenir envisageable par les producteurs.

Plusieurs techniques se sont révélées efficaces : le broyage des feuilles, leur retrait du champ ou leur enfouissement. L'utilisation de l'urée, qui fait l'objet de nombreuses références bibliographiques, est peu pratiquée en France et ne fait l'objet d'aucun travail d'expérimentation. Malgré des réticences légitimes sur son utilisation à l'automne pour des raisons environnementales, l'urée présente de nombreux atouts. Son faible coût, sa facilité de mise en œuvre, la possibilité d'application au sol au printemps, et surtout son efficacité potentielle justifient pleinement de s'intéresser à son utilisation. L'objectif de ce mémoire est d'analyser les causes de son désintérêt et d'étudier dans quelle mesure l'utilisation de l'urée peut contribuer à un meilleur raisonnement de la lutte contre la tavelure et si possible, permettre de limiter l'usage des fongicides de synthèse.

Le CEHM, station régionale d'expérimentation, a pour mission d'apporter aux producteurs des solutions concrètes à leurs problèmes de production. En ce sens, elle se trouve à mi-chemin de la recherche et du développement. Le travail qui a fait l'objet de ce mémoire a été réalisé dans ce cadre précis. Les expérimentations ont été réalisées pour partie sur la station du CEHM et pour partie chez les producteurs, et avec leur participation.

Dans une première partie, après une présentation générale du pathogène, un travail de recherche bibliographique sur la prophylaxie en général et l'utilisation de l'urée en particulier sera présenté. Dans la seconde partie l'approche expérimentale sera développée. Enfin la dernière partie consistera en une discussion générale sur les problématiques liées à la gestion de la lutte contre la tavelure du pommier en relation avec la prophylaxie

1. Synthèse bibliographique

1.1. Le couple hôte (pommier) / champignon pathogène (*Venturia inaequalis*)

1.1.1. Présentation générale du champignon

L'agent causal de la tavelure du pommier est un champignon ascomycète de la famille des Venturiaceae : *Venturia inaequalis* (Cooke.) G. Winter pour la forme sexuée (parfaite) ou *Spilocaea pomi* (Fr.) pour la forme asexuée (imparfaite), Ascomycète, Loculoascomycetidae, Pléosporaceae.

La tavelure est présente dans toutes les zones de production de pommes. Sans être un parasite obligatoire du pommier ce champignon lui est malgré tout souvent associé. Son adaptation à cette espèce est un remarquable exemple de coévolution (MacHardy *et al.*, 2001). Mais la sélection variétale, la culture mono-espèce et mono-variétale, la densification et l'intensification de la production ont entraîné un déséquilibre entre les relations de l'hôte et du parasite (Burdon et Chilvers, 1982 cités par Rapilly, 1991). Dans les zones tempérées, à printemps humide, la tavelure peut avoir un impact économique important sur la production.

Le parasite ne met jamais en danger la survie de son hôte. En effets, les dégâts sont d'autant moins importants que l'hôte est faible (peu de croissance). Dans les cas extrêmes, la possibilité de descendance lui est toujours laissée puisque le champignon n'affecte pas le potentiel germinatif des pépins (MacHardy *et al.*, 2001).

1.1.2. Symptômes (cf. annexe 1)

1. Symptômes sur bois

Les taches ou pustules sur bois non lignifié sont assez fréquentes, notamment en cas de forte attaque (Swinburne, 1965 ; Becker, *et al.*, 1992). La conservation sous forme de chancre dans les bois est beaucoup plus rare que pour la tavelure du poirier (*Venturia pyrina* Aderh.). Néanmoins, ce symptôme est parfois observé (Creemers, comm. pers.).

2. Symptômes sur les pièces florales

Les pièces florales sont parfois atteintes, notamment les sépales et le pédoncule. Le développement de la tavelure sur ces organes est souvent suivi d'un phénomène de coulure (chute des fleurs) (Bovey *et al.*, 1967). Ces dégâts passent souvent inaperçus de l'observateur. Pourtant, à ce stade particulièrement sensible et précoce, les conséquences finales de l'épidémie risquent d'être très graves (Kennel, 1987, cités par Biosecurity Australia, 2005 ; Sanogo et Aylor, 1997).

3. Symptômes sur les feuilles

Les taches sont de forme circulaire, de couleur brun verdâtre à brun foncé. Au printemps, les taches sont principalement visibles sur la face supérieure du limbe. Elles sont dans un premier temps translucides dites « taches d'huiles » puis olivâtres et prennent un aspect velouté. Souvent, le limbe est déformé et l'intérieur des taches brunit (Bovey *et al.*, 1967).

En été les taches sont plus petites mais nombreuses et souvent confluentes. Elles recouvrent une partie importante du limbe, le long des nervures. Les feuilles fortement infectées jaunissent et tombent (Bovey *et al.*, 1967).

A l'automne les taches sont plus nombreuses et de petite taille (2 à 3 mm de diamètre), parfois plus diffuses et en général plus fréquentes en face inférieure du limbe.

4. Symptômes sur les fruits

Les fruits sont sensibles à tous les stades de développement. Les attaques précoces entraînent une chute des jeunes fruits. Les tissus cessant de croître au niveau de la tache, le fruit peut subir une forte déformation quand la contamination est précoce. Les zones nécrosées se crevassent plus ou moins profondément. Les taches résultant d'attaques tardives sont plus superficielles, voire quelque fois bordées de rouge. Les symptômes peuvent apparaître pendant la période de conservation (Bovey *et al.*, 1967).

5. Symptômes de tavelure de conservation sur fruits

Il arrive que l'on constate des taches de tavelure sur fruits en sortie de conservation alors que la récolte semblait saine à l'entrée en chambre froide. Les symptômes sont alors assez caractéristiques : les taches sont nombreuses et de petite taille. Leur diamètre peut, néanmoins, être d'autant plus important que la température de stockage est élevée (Tomerlin et Jones, 1983, cités par MacHardy, 1996). En général ces symptômes correspondent à des contaminations ayant eu lieu en verger dans les semaines qui précèdent la récolte (Schwabe, 1980 ; MacHardy, 1996) voire pendant l'été (Olivier, 1986). La durée d'incubation en condition de conservation peut être extrêmement variable, ainsi MacHardy (1996), citant des travaux de Bratley de 1937, indique que le délai d'incubation (après inoculation artificielle) peut varier entre 23 jours et 6,5 mois selon les conditions de stockage.

1.1.3. Cycle biologique de *Venturia inaequalis* (Cke) Wint.

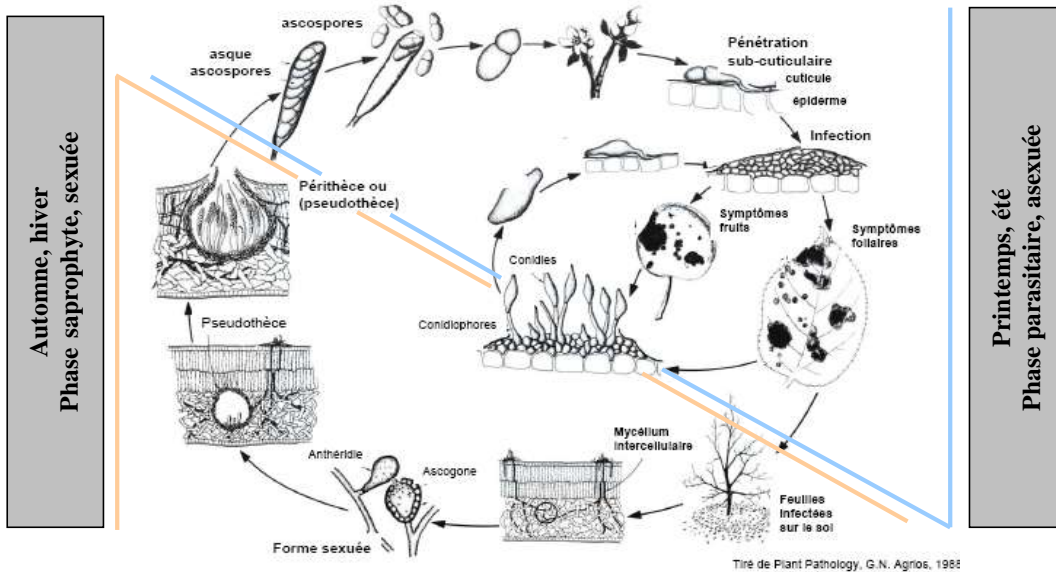


Figure 1 : Le cycle de *Venturia inaequalis* (Agrios, 1988)

1.1.4. Conservation de *V. inaequalis*

1. Mode de conservation majeur : une phase saprophyte

La phase saprophyte de *V. inaequalis*, se déroule au sol dans la litière hivernante. La reproduction est sexuée, sous forme de périthèces. Ces périthèces contiennent en moyenne 120 asques, chaque asque contenant 8 ascospores bicellulaires.

Le terme de « périthèce » désigne l'ascocarpe des Pyrénomycètes, qui est une fructification en forme de bouteille, avec un pore à son apex, contenant les asques et les ascospores. Chez les Loculoascomycètes, le fait que cet organe soit inclus dans le parenchyme de la feuille hôte en fait un pseudothèce (Luttrell, 1973). C'est cette dernière appellation qui est retenue dans les publications internationales. Dans ce travail, nous nous en tiendrons à la dénomination de périthèce, qui est parfois employée d'une manière plus générique, et désigne, dans ce cas, toute fructification en forme de bouteille chez les Ascomycètes.

▪ **Conditions d'initiation et de développement des périthèces**

Ce stade étant sexué, et *V. inaequalis* étant un champignon hétérothallique, la condition première de son initiation est la présence dans la même feuille d'au moins deux individus de signe complémentaire. La rencontre de leurs mycéliums est le point de départ de la formation des périthèces.

L'initialisation des périthèces a lieu dans les quatre semaines qui suivent la chute des feuilles. S'en suit une période de latence d'environ six semaines durant laquelle aucune évolution n'est visible (Burchill et Cook, 1971). Les phénomènes en jeu au cours de ces dix semaines ne sont pas parfaitement connus (MacHardy, 1996), mais un certain nombre de paramètres peuvent influencer l'initiation ou le développement des périthèces, peut être citée :

✓ Le type de lésions sur les feuilles de la litière

Schwabe et Matthee (1971), ont montré que les contaminations d'automne génèrent une plus forte production d'ascospores projetables (au printemps suivant) que les contaminations de printemps ou d'été. Les taches discrètes, issues des contaminations par ascospore au printemps, ont moins de chance d'être à l'origine de la formation de périthèces que les taches diffuses. En effet, dans des vergers normalement traités, le risque d'avoir plus d'une tache par feuille, condition nécessaire pour une multiplication sexuée, est beaucoup plus faible au printemps qu'en automne. Théoriquement, une seule grosse tache en face supérieure ne peut être à l'origine de périthèces que si des petites taches en face inférieure autorisent une fécondation croisée (Olivier, 1986). On observe néanmoins parfois des périthèces alors qu'une grosse tache unique est visible. Ceci a fait supposer à certains auteurs que les taches pouvaient être issues d'une projection de paire, de triade, voire de tétrades d'ascospores (MacHardy *et al.*, 2001).

Les lésions discrètes sont, en général, situées sur la face supérieure des feuilles. Dans ce cas les périthèces sont localisés en périphérie de la lésion. Les lésions diffuses se développent plus souvent en face inférieure des feuilles (cf. annexe 1). Dans ce cas les périthèces sont situés de manière plus diffuse sur la feuille (MacHardy, 1996).

Keitt et Jones en 1926 ont supposé que le champignon se développait prioritairement en face inférieure en fin de saison car les faces supérieures développaient plus rapidement la résistance ontogénique (ce sujet sera traité plus loin). Mais ce phénomène reste mal connu, MacHardy émet plusieurs hypothèses : (i) la face supérieure peut avoir reçu plus de fongicide que la face inférieure, dans ce cas il serait possible que d'éventuels résidus puissent être encore actifs à l'automne. Cette hypothèse paraît peu probable puisque l'on peut retrouver ces symptômes dans certains vergers abandonnés. (ii) La résistance ontogénique peut être plus durable en face supérieure qu'en face inférieure. (iii) Les courants thermiques ascendants peuvent déposer les conidies en face inférieure. (iv) les conidies

déposées en face supérieure peuvent être altérées par l'exposition au soleil. (v) Les contaminations peuvent être très antérieures et être restées latentes plus facilement en face inférieure ...
La diversité des hypothèses reflète bien les doutes du chercheur sur ce point particulier de la biologie de *V. inaequalis*.

✓ L'époque de chute des feuilles

Plus la chute des feuilles est tardive, plus la production de périthèces est importante. Plus la chute des feuilles est précoce, plus la maturité des périthèces est précoce (MacHardy, 1996).

✓ La température

La température idéale pour la formation de périthèces est 4°C dans les 28 jours qui suivent la chute des feuilles. Par la suite, la température idéale pour leur développement est de 10°C (MacHardy, 1996).

✓ L'hygrométrie

Les alternances de périodes sèches et humides sont favorables à la maturation des périthèces (Louw, 1951).

En situation de faible hygrométrie hivernale, notamment situation de désherbage total, la formation des périthèces est fortement réduite et/ou retardée (Bézet, et Bernaux, 1970 ; Obs. SRPV Avignon et Obs. pers., 2005).

✓ Aptitudes génétiques

L'aptitude à produire des périthèces est variable selon les souches de *V. inaequalis*. (Cook, 1969), et les cultivars. Mais si ce point est assez bien renseigné pour certains cultivars anciens et/ou nord américains, aucune donnée n'est disponible (à notre connaissance) sur les cultivars actuellement cultivés en France (hors Golden Delicious).

▪ **Maturité des périthèces**

La régulation de la vitesse de maturation des périthèces par la température tend à se synchroniser avec la période de repos végétatif de l'hôte. Ainsi, quelle que soit la date de chute des feuilles ou la date de débourrement du pommier, les premières ascospores mûres correspondent souvent avec l'apparition des premiers organes réceptifs de l'hôte (MacHardy *et al.*, 2001). Il est d'ailleurs frappant de noter que durant la période où le pommier a besoin d'accumuler des températures froides (Bidabé, 1967) la température optimale de développement des périthèces est basse (4°C) alors que lorsque le pommier commence à accumuler des « heures chaudes » l'optimum de développement de la tavelure est lui aussi plus élevé (10°C en phase de développement puis 20°C en phase de maturation).

On a cependant observé certaines années, des décalages entre le débourrement du pommier et la date de maturité des périthèces. Suite à des conditions climatiques hivernales atypiques, un fort décalage peut même être observé (plus de 15 jours observés en 2005 au CEHM). Ce point rend souvent délicat l'initialisation de la courbe de maturation des ascospores utilisée dans les modèles.

▪ **Autres modes de conservation connus ou supposés**

L'hypothèse de la conservation hivernale du champignon sous forme conidienne (forme asexuée du champignon) remonte au début des années 1900 (MacAlpine, 1902 et Lawrence, 1904 cités par MacHardy, 1996) mais pendant longtemps, aucune étude n'a pu vérifier cette possibilité (Wallace, 1913 ; Keitt et Jones, 1926 ; Louw, 1948 et 1951). Assez récemment, plusieurs études l'ont vérifiée dans certaines conditions (Becker, 1990 ; Becker *et al.*, 1992 ; Holb *et al.*, 2004 et 2005). Ces études ont montré que les conidies viables pouvaient se conserver à l'intérieur des bourgeons (Becker *et al.*, 1992), notamment en cas de très forte attaque l'année précédente (Holb *et al.*, 2004). Ces conidies

peuvent infecter l'arbre avant les ascospores, notamment à l'occasion d'une période sèche (Gloyer, 1937).

Dans les pays à climat doux comme en Israël, des cultivars à faible besoin en froid, qui débourent donc très précocement (Cv. Anna), pourraient être sensibles à ce mode de contamination, alors que les ascospores n'ont pas encore atteint la maturité (Shabi *et al.*, 1981). Dans ce même pays, une étude antérieure a confirmé la présence de conidies viables ayant hiverné sur des feuilles restées sur l'arbre, mais aussi sur des feuilles au sol (Rotem *et al.*, 1966). Cette même étude a mis en évidence que ces conidies ont été à l'origine de contaminations précoces dans les vergers

La conservation sous forme mycélienne est également possible. Elle a été mise en évidence dans les brindilles de l'année (Stensvand *et al.*, 1996, cités par Biosecurity Australia, 2005), dans les pousses plus âgées (Moosherr et Kennel, 1995, cités par Biosecurity Australia, 2005) et dans les écailles de bourgeons (Salmon et Ware, 1931, cités par Biosecurity Australia, 2005).

Un autre mode de conservation, plus fréquent dans nos régions, est à signaler. Dans les vergers pour lesquels on constate une reprise de croissance à l'automne (en situation de forte vigueur), la défoliation des bois nouvellement émis est souvent tardive. Dans ces conditions, il arrive parfois que la partie terminale du rameau conserve ses feuilles jusqu'à la saison suivante. Si ces feuilles portent des symptômes de tavelure, il est très probable que des conidies puissent constituer un inoculum pour le printemps suivant (Triloff, cité par MacHardy, 1996 ; Creemers, comm. pers.).

2. Phase parasitaire de *V. inaequalis*

Si la phase saprophyte prend fin avec les dernières projections d'ascospores, la phase parasitaire commence dès les premières projections.

▪ **La phase de contamination primaire.**

✓ Les projections d'ascospores

Lors d'une pluie, les périthèces, dans les feuilles de la litière, se gonflent d'eau. La pression augmente dans le périthèce, les ascospores sont expulsées des asques mûres. Une faible pluie (>0,2 mm) suffit pour provoquer une projection conséquente (Hirst et Stedman, 1962). La densité maximale de spores présente dans l'air est atteinte avec une pluie discontinue de 0,25 mm/h (Aylor et Sutton, 1992). Gadoury *et al.* (1993) signalent qu'une pluie faible favorise le transport et le dépôt des ascospores. La rosée seule peut être à l'origine de la projection d'ascospores (Hirst et Stedman, 1962 ; MacHardy, et Gadoury, 1986 ; Gadoury *et al.*, 1993 ; Stensvand *et al.*, 1998 ; MacHardy *et al.*, 2001). Mais les conditions de vent nécessaires à la reprise et au transport des ascospores sont rarement associées à ces conditions.

Brooks, en 1969, a mis en évidence que la projection des ascospores est stimulée par la lumière rouge (cité par Gadoury *et al.*, 1993). Sur la base de ces travaux MacHardy et Gadoury (1986) ont montré que les projections ont majoritairement lieu durant la journée, avec un pic de projection entre 11h et 12h soit, 5 à 6 heures après le lever du soleil. Ces auteurs observent malgré tout que 8 à 10% des ascospores sont projetées la nuit, notamment si la pluie et les projections ont démarré avant le coucher du soleil (Warner et Braun, 1992 ; Stensvand *et al.*, 1997). En cas de pluie nocturne, il y a projection si les périthèces contiennent plus d'un tiers des ascospores matures (Rossi *et al.*, 2003).

Gadoury *et al.* (1998) ont proposé de ne tenir compte des projections nocturnes qu'à partir d'un certain seuil d'inoculum (PAD>1000). A notre connaissance, cette idée n'a pas été reprise par la suite.

La température optimale pour les éjections d'ascospores est de 20°C (MacHardy, 1996). Il a parfois été dit qu'en dessous de 10 degrés, les projections n'étaient pas possibles (Bézet et Bernaux, 1970). En

fait, il a été montré que, bien que ralenties, les projections sont possibles jusqu'à des températures proches de 2°C (Seem *et al.*, 1979). Mais la projection est d'autant plus tardive que la température est basse (Hirst et Stedman, 1962).

Au dessus de 32°C les périthèces avortent (James et Sutton, 1982).

La projection mécanique se fait sur 0,1 à 13,2 mm à partir du périthèce, la distance moyenne étant de 3 mm (Aylor et Anagnostakis, 1991, Gadoury *et al.*, 1993). Reprises par le vent, les ascospores utilisent ce moyen de dispersion pour, éventuellement, atteindre les organes verts de leur futur hôte.

L'influence éventuelle du vent (phénomène de dessiccation) et de la lumière sur les ascospores déposées sur les feuilles et les fruits n'est pas connue (MacHardy, 1996).

✓ La contamination par les ascospores

Les ascospores sont couvertes d'une gangue de mucilage favorisant l'adhérence sur les tissus de l'hôte quelle que soit la rugosité du support (MacHardy *et al.*, 2001). Une fois sur l'hôte, la spore émet un tube germinatif qui se renfle au contact de la cuticule (*apressorium*) et la transperce mécaniquement. Le champignon forme un stroma dans les tissus de l'hôte d'où diffuse le mycélium (MacHardy, 1996).

L'optimum de germination se situe entre 14 et 18°C, mais celle-ci peut se faire sur une large gamme de températures. Ainsi, bien que fortement ralentie par faible température, la tavelure fait preuve d'une remarquable capacité à germer dans des conditions extrêmes. Contrairement à beaucoup d'autres champignons pathogènes comme l'oïdium du pommier (*Podosphaera leucotricha* (Ell. & Ev.) Salmon) la germination des ascospores est possible après 30 heures à 1°C (Stensvand *et al.*, 1997). Par forte température, la germination est possible jusqu'à 32°C.

La vitesse de la contamination (pénétration du tube germinatif) est dépendante de la température et de la durée d'humectation (Mills et LaPlante, 1951). Le temps d'humectation nécessaire à la contamination est d'autant plus faible que la température est élevée (pour des températures inférieures à 24°C).

Le temps d'humectation nécessaire pour l'infection est nettement supérieur pour les fruits que pour le feuillage. Ce temps est aussi très dépendant du cultivar. Pour Granny Smith l'infection pour les fruits nécessite 30 à 40 heures de plus que pour les feuilles (Olivier, 1986).

La période d'incubation avant l'apparition des taches est de 180°C jours (en base zéro) en moyenne (Calméjane, cité par Dionnet, 1982). Mais ce temps est variable selon l'âge auquel la feuille a été contaminée. Ainsi les symptômes apparaîtront-il plus rapidement lorsque la contamination s'est produite sur des feuilles jeunes (MacHardy, 1996).

▪ **Contaminations secondaires**

✓ Formation des conidies

La surface des taches peut augmenter jusqu'à 2 cm de diamètre dans les 7 à 10 jours qui suivent l'apparition des taches avant de produire des conidiophores (MacHardy *et al.*, 2001). Ce développement rapide ne se produit que sur les feuilles n'ayant pas atteint leur taille définitive.

Une fois formées, les conidiophores émettent des conidies. Le nombre de conidies émises par une tache peut être extrêmement important (15 à 30 000 pour Golden Delicious).

La sporulation n'a pas lieu en condition sèche (HR < 60%) et est optimale à 90% d'humidité. La lumière ne semble pas avoir d'influence sur la sporulation, mais l'obscurité continue réduit la sporulation de plus de 30 %. La fourchette de température optimale de production de conidies est comprise entre 16 et 20°C avec un minimum de 4°C et un maximum de 28°C. La sporulation des

conidies est significativement corrélée à la température moyenne, et est finalement assez peu dépendante des précipitations et de l'hygrométrie (MacHardy, 1996).

La production de conidies s'arrête en général après 30 à 36 jours (MacHardy, 1996).

✓ Dissémination des conidies

La dissémination des conidies est essentiellement diurne (Hirst et Stedman, 1962). D'autres auteurs ont observé que le maximum de conidies dans l'air était observé en début d'après midi et début de soirée. Leur hypothèse est que ces périodes correspondent respectivement au pic de vent et au début de la rosée (Sutton *et al.*, 1976).

La présence d'eau favorise grandement le détachement et le transport des conidies. Sous l'effet de la pluie, les conidies se détachent mécaniquement de leur support et sont entraînées par l'eau de ruissellement sur les organes verts voisins. Les contaminations se succèdent au gré des épisodes pluvieux tout au long de la période végétative (Bovey *et al.*, 1967).

La contamination conidienne n'est cependant pas complètement dépendante de la pluie. Les conidies peuvent être détachées mécaniquement des conidiophores en condition de vent fort, et ce quelle que soit l'humidité de l'air (Frey et Keitt, 1925 cités par MacHardy, 1996 ; Sutton *et al.*, 1976). Ces derniers auteurs supposent d'ailleurs que c'est plus le frottement des feuilles entre elles que le vent lui-même qui entraîne le détachement des conidies (Sutton *et al.*, 1976).

Ces conidies déposées sur les feuilles durant le jour, peuvent germer et entraîner une infection durant la nuit lorsque les feuilles sont mouillées par la rosée (Sutton *et al.*, 1976).

La majeure partie des conidies n'est pas transportée hors de la canopée. En effet, le poids et la forme des conidies ne sont pas favorables à un transport sur de longues distances (Wiesmann, 1935, cité par MacHardy, 1996). Néanmoins, Hirst et Stedman (1962), signalent une conidie de *V. inaequalis* captée par un avion à 610 m d'altitude au milieu de la Manche... !

✓ Contaminations conidiennes

La maturité des premières conidies marque le début des contaminations secondaires.

Les conditions de température favorables à la germination des conidies sont de 14-15°C avec un minimum de 3°C et un maximum de 31°C (Doran, 1922, cité par MacHardy, 1996).

Comme pour les ascospores, la contamination par les conidies est dépendante de la température et de la durée d'humectation (figure 3). Dans les années 1950, Mills avait défini que le temps nécessaire à une contamination par les conidies était approximativement de deux tiers inférieur à celui nécessaire pour les ascospores (Mills, cité par MacHardy, 1996). Or il a depuis été démontré que les ascospores mettaient environ trois heures de moins à germer (Schwabe, 1980 ; MacHardy et Gadoury, 1989). Le fait que Mills n'ait pas pris en compte les différences d'intensité de projection entre le jour et la nuit peut expliquer cette divergence (MacHardy, 1996).

A l'automne, avec la baisse des températures et les pluies, les conditions de contamination deviennent plus fréquentes. Les contaminations d'automne sont à l'origine de la constitution de la majeure partie de l'inoculum pour l'année suivante. Ces contaminations ne sont possibles qu'avec la levée (au moins partielle) de la résistance ontogénique (cf. paragraphe 1.2.3).

1.1.5. Epidémiologie de *Venturia inaequalis*

La progression d'une épidémie en pathologie végétale est de plus en plus rapide jusqu'à ce que le nombre de tissus susceptibles d'être contaminés devienne limitant. Ceci confère aux représentations des épidémies l'allure de courbes en « S » caractéristiques si rien n'en interrompt le déroulement (Rapilly, 1991).

L'épidémie n'est jamais de 100%, un certain nombre d'organes, du fait de la résistance ontogénique notamment, ne sont pas atteints par l'épidémie. C'est la notion de « *removal* » de Van der Plank. Pour le pommier cette valeur est de l'ordre de 20% des tissus (Gessler, C., comm. pers.).

Van der Planck (1963) a proposé une représentation de l'évolution des épidémies. Par analogie avec les prêts bancaires, cet auteur classe celles-ci en deux catégories, les épidémies à intérêts simples (EIS) et les épidémies à intérêts composés (EIC). Les premières caractérisent les épidémies dont l'inoculum secondaire n'est pas à l'origine de nouvelles contaminations durant le même cycle, alors que les secondes caractérisent les épidémies pour lesquelles il y a cumul des contaminations primaires et secondaires. Pour la tavelure, en début de saison, l'épidémiologie répond aux caractéristiques d'une EIS, mais dès les premières taches l'épidémie devient de type EIC. L'importance de l'inoculum primaire a un fort impact sur l'évolution des EIS, pour les EIC c'est plutôt la pente de la droite de régression « *r* » (après linéarisation en $\log e(x/1-x)$) qui illustre le mieux la vitesse de progression de la maladie (Rapilly, 1991).

Cette valeur « *r* », définie pour la tavelure comme étant de 0,14 pour Golden dans le Trentin, est probablement encore inférieure en secteur méditerranéen (Gessler, comm. pers.). Cette pente est relativement faible pour une maladie polycyclique en comparaison par exemple du $r=0,4$ pour *phytophthora infestans* (on notera que plus récemment la surface sous la courbe, l'AUDPC, a été utilisée préférentiellement par les auteurs). Le délai en temps pour atteindre un niveau d'attaque donné sera d'autant plus long que la pente sera faible. Conséquence directe de cela, plus la pente est faible, plus l'inoculum a d'influence sur l'évolution de l'épidémie.

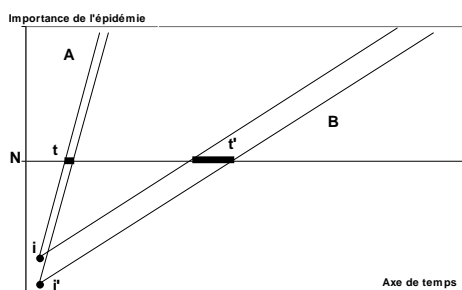


Figure 2 : Evolution de l'épidémie selon l'inoculum initial

Délai de temps (t , t'), mis pour atteindre un niveau d'attaque « *N* », pour deux maladies (A et B) ayant des vitesses de progression d'épidémies différentes, selon l'importance de l'inoculum initial (i , i'). (d'après Gessler, comm.pers.)

En fonction de ces bases épidémiologiques, deux observations peuvent être faites : (i) Le retard pris par l'épidémie du fait d'un moindre inoculum primaire laisse plus de chance de passer sans dommage la période de forts risques du mois d'avril. En effet, cette période qui voit la conjonction des risques de pluies, de surface foliaire sensible maximale et de volume d'ascospores projetables maximal, est la période clef de la lutte contre la tavelure. (ii) Si la lutte chimique permet de retarder suffisamment l'apparition des taches, l'évolution de la maladie a plus de chance de rester de type EIS puisque avec les températures estivales et l'augmentation de la résistance ontogénique, il est probable que l'épidémie marque une période de stabilisation limitant les contaminations secondaires.

On voit donc que, même pour une maladie polycyclique comme la tavelure, l'importance de l'inoculum peut être déterminante, puisque (i) la probabilité d'apparition des premières taches est directement reliée au volume de l'inoculum (MacHardy, comm. pers.), et que (ii) la tavelure présente une pente de progression épidémiologique relativement faible.

On notera que les cultivars les moins sensibles à la tavelure sont aussi ceux qui présentent la pente de progression la plus faible (Parisi *et al.*, 2004), (cf. annexe 2). En conséquence moins le cultivar est sensible, plus la prophylaxie est efficace.

1.1.6. L'inoculum : importance et quantification

Suite aux problèmes constatés en 2004 dans les trois grands bassins de production français, une enquête a été réalisée par le Ctifl. Sur les cas étudiés en BRM, dont une majorité en Languedoc, 86 % des vergers atteints en 2004 l'étaient déjà en 2003 (Giraud et Orts, 2006). Cette constatation illustre la multitude d'observations qui sont régulièrement faites par les techniciens de terrain : la première année on note la présence de taches isolées, l'année suivante on constate une attaque significative.

La quantification plus précise de l'inoculum dans les années 80 a été le début d'une approche plus fine du raisonnement de la lutte contre la tavelure (Olivier, 1984 ; Gadoury et MacHardy, 1986).

En fonction de son origine, on distingue l'auto-inoculum, qui est endogène à la parcelle, de l'allo-inoculum qui lui, est exogène à la parcelle (Rapilly, 1991).

1. Allo-inoculum : le problème de l'environnement

▪ **Dissémination de feuilles**

Le sujet est abordé par certains auteurs (Creemers, *et al.*, 2002), mais a peu été étudié. Le transfert de feuilles par le vent pendant l'hiver peut pourtant être important en secteur méditerranéen. Les hivers secs, par fort mistral, on a pu constater de forts déplacements de feuilles (Languedoc, 2005. obs. pers.). Pour des vergers mitoyens, il peut donc y avoir transfert d'inoculum d'un verger vers un autre. Pour un verger isolé, ce peut être, au contraire, une technique prophylactique naturelle par enlèvement des feuilles. Les déplacements de feuilles par les engins ou palox peuvent être, sans doute, à l'origine de diffusion de race de *Venturia inaequalis*.

▪ **Dissémination d'ascospores**

Les ascospores sont projetées à une distance très faible, 3 mm en moyenne (Aylor et Anagnostakis, 1991). Ces ascospores doivent ensuite être reprises par le vent pour être transportées sur une certaine distance. Certains auteurs ont montré qu'il était théoriquement possible que quelques rares ascospores soient transportées sur plusieurs kilomètres (Aylor, 1998), mais il est en général admis que la distance de transport est assez faible. La concentration d'ascospores dans l'air est maximale à la source (verger contaminé) puis décroît de façon exponentielle avec la distance (Aylor, 1998). A une distance de 5,5 mètres le nombre d'ascospores dans l'air est négligeable pour certains auteurs (Kaplan, 1986, cité par Holb *et al.*, 2004) alors que pour d'autres cette quantité ne devient négligeable qu'à 60 m (Hirst et Stedman, 1962). Il semblerait qu'une distance de 20 à 30 mètres constitue la distance d'influence majeure d'une source d'inoculum (Aylor, 1998 ; Holb *et al.*, 2004 ; Gomez *et al.*, 2007).

2. Auto-inoculum

A l'automne, les feuilles tavelées d'une parcelle constituent la principale source d'inoculum. Il est donc important, avant d'envisager une stratégie de lutte d'en quantifier l'importance.

- **A quelle époque quantifier l'inoculum d'une parcelle ?**

L'importance de l'inoculum pour une saison est souvent estimée à partir des dégâts observés sur les fruits à la récolte précédente. Mais cette indication est généralement insuffisante pour deux raisons : (i) l'intensité des attaques peut être différente sur fruits et feuilles et (ii) le développement de la maladie sur la partie végétative de l'arbre peut être très important entre la récolte et la chute des feuilles (Olivier, 1984), notamment pour les cultivars précoces comme Gala. L'observation doit donc se faire le plus proche possible de la chute des feuilles. Toutefois, on verra plus loin que même cette date tardive ne permet pas de prendre en compte la totalité de l'inoculum.

- **Les méthodes de quantification de l'inoculum**

Convaincu que l'intensité de la lutte pouvait être modulée en fonction de l'importance de l'inoculum, Olivier a sans doute été l'un des premiers à proposer une méthode de quantification facile à mettre en œuvre en vergers (Olivier, 1984). Sa méthode de comptage prend en compte le nombre et l'intensité des taches à l'automne (cf. annexe 3).

Gadoury et MacHardy (1986), ont proposé la notion de PAD (Potential Ascospore Dose) pour quantifier l'inoculum d'une parcelle (cf. annexe 4). Le PAD correspond à la quantité d'ascospores par m² de verger. Plus tard, MacHardy (1996), a proposé un seuil de PAD de 600 ascospores par m² de verger pour pouvoir mettre en œuvre une lutte chimique réduite. Mais le calcul du PAD est assez lourd à réaliser et l'utilité d'une telle précision est assez discutable dans le cadre de la gestion commerciale des vergers. D'autre part les expériences récentes, conduites avec le PAD ont montré qu'il n'y a pas forcément de relation entre le nombre de taches par feuille et la quantité d'ascospores projetées (MacHardy, comm. pers.)

Aussi ces auteurs ont proposé une version très allégée de quantification de l'inoculum avec la méthode de comptage dite « séquentielle » (MacHardy *et al.*, 2000 et 2001). Cette méthode propose un échantillonnage progressif en fonction du nombre total de feuilles tavelées (cf. annexe 5). Néanmoins, une comparaison de différentes méthodes de quantification de l'inoculum réalisé par Didelot *et al.*, (UMR Pavé, INRA/INH/U. Angers, comm. orale) en 2004, a montré que cette technique manquait de finesse en situation de faible inoculum.

La méthode dite « standard » qui consiste en une simple proportion de pousses avec présence de tavelure, n'a, à notre connaissance, jamais fait l'objet de validation scientifique. Sa simplicité en fait pourtant la méthode la plus fréquemment utilisée (Giraud, comm. pers.) (cf. annexe 6).

- **Les limites des méthodes de quantification**

Les conidies peuvent contaminer les feuilles à tous les âges, mais le développement du mycélium sera beaucoup plus lent dans les feuilles âgées. Ainsi, pour une contamination en cours d'automne, les symptômes sur vieilles feuilles peuvent tout à fait apparaître après leur chute (MacHardy, 1996 ; Li et Xu, 2002). Or ces feuilles participent à l'inoculum mais ne sont pas prises en compte dans les comptages.

Une des grandes difficultés dans le choix d'une stratégie de protection pour la saison à venir est la quantification de l'inoculum réel du verger. De nombreux travaux ont porté sur la quantification de l'inoculum (potentiel) d'automne (Olivier, 1984 et 1986 ; MacHardy, 1996 entre autre). Plusieurs également ont porté sur les conditions de conservation durant la phase saprophyte (James et Sutton, 1982 ; MacHardy *et al.*, 2000). Mais finalement assez peu d'auteurs (MacHardy *et al.*, 2000.) ont essayé de faire le lien entre les deux pour proposer une information sur le risque réel en sortie d'hiver, prenant en compte les conditions climatiques hivernales d'initiation et de développement des

périthèces. Ce point fait actuellement l'objet d'une collaboration scientifique entre différents chercheurs européens et Nord-américains (Stensvand et Philion, comm. pers.)

La sensibilité variétale doit également être prise en compte, il est probable qu'à inoculum égal (% de pousses tavelées) un cultivar peu sensible génère moins de périthèces qu'un cultivar plus sensible (Durel comm. pers.).

1.2. Développement de *Venturia inaequalis* en verger abandonné.

On observe régulièrement dans les vergers abandonnés (et dans une moindre mesure dans les vergers conduits en agriculture biologique) une sensibilité à la tavelure beaucoup plus faible que dans les vergers conventionnels (nombreux témoignages). Quatre raisons, au moins, peuvent expliquer ces observations. (i) La croissance de ces vergers est en général assez faible. La surface foliaire sensible à une période donnée est donc très inférieure à celle d'un verger vigoureux ou même moyennement vigoureux (Crété, 2006). (ii) Les populations microbiennes sur le feuillage et l'influence de la pression des produits phytosanitaires sur la sélection de cette population peuvent avoir un effet très important (Andrews, 1981). Cet auteur a montré que les populations microbiennes étaient influencées de façon très significative en quantité et en qualité par des pesticides appliqués 5 à 7 mois avant les observations. (iii) La vie microbienne du sol et le mode de conduite de la bande de plantation sont sans doute beaucoup plus favorables à une décomposition rapide de la litière hivernante (Gessler, comm. pers.). (iv) On observe dans les vergers abandonnés un enherbement dense et haut qui, en plus de créer des conditions favorables à la décomposition de la litière, constitue un obstacle physique important pour la reprise par le vent des ascospores projetées (obs. pers.). A ce propos, les feuilles se dégradant également plus rapidement dans l'herbe que sur sol nu, il serait sans doute intéressant de comparer la densité d'ascospores dans l'air avec, ou sans désherbage de printemps.

1.3. La lutte : principes et contraintes

1.3.1. Les choix variétaux

A ce jour, parmi les critères de choix d'un cultivar par les producteurs (cf. tableau 1), la sensibilité aux phyto-agresseurs n'intervient que très peu (Parisi *et al.*, 2004 ; Vanloqueren et Baret, 2005,a). De fait, la majeure partie du verger français est constituée de cultivars très sensibles (Parisi *et al.*, 2004). On peut citer Gala bien sûr, mais aussi, Fuji, Braeburn, Pink Lady®, Sundowner®, Tentation®. Le cultivar Gala, qui occupe une part importante du verger Français (16,3 %, Agreste 2002), est sans doute celui qui présente la plus grande sensibilité à la tavelure. Plusieurs raisons à cela :

- Ce cultivar (comme Braeburn) ne possède aucun gène de résistance connu (Parisi *et al.*, 2004).
- Sa récolte étant effectuée en août, aucun soin phytosanitaire particulier ne lui est apporté par la suite et durant l'automne, plusieurs cycles de contaminations secondaires suffisent à multiplier l'inoculum de façon importante avant la chute des feuilles.
- La commercialisation est souvent rapide, aucun traitement de conservation (susceptible d'avoir un effet sur la tavelure) n'est donc, en général, effectué au verger.
- On observe que cette variété possède une grande aptitude à produire de l'inoculum d'automne sans que l'on puisse dire s'il s'agit d'une conséquence des points précédents ou d'une spécificité propre.

Les cultivars à résistance complète à la tavelure susceptibles d'être plantés à ce jour, possèdent quasiment toutes le gène de résistance *Vf*, issu de *Malus floribunda clone 821* (Lespinasse et Fouillet, 1990). Or ce type de résistance est déjà contourné dans de nombreux pays, y compris dans le nord et l'ouest de la France (Parisi *et al.*, 2000 et 2004). Actuellement les travaux de sélection s'orientent plus vers la recherche de résistances partielles à caractère polygénique qui, associées au gène *Vf* et à une

protection phytosanitaire légère permettraient d'envisager une meilleure durabilité de la résistance (Lespinasse *et al.*, 1999).

Tableau 1 : Critères de choix d'un cultivar par les producteurs

Pourquoi les cultivars résistants ne sont pas choisis par les producteurs	Pourquoi cette situation pourrait évoluer dans les années à venir
La lutte chimique est encore efficace	Pression constante et croissante de la société civile contre l'utilisation de pesticides
Le risque commercial est trop grand	
Ces variétés sont encore peu conseillées	
La fragilité de la résistance (monogénique Vf)	Apparition de cultivars à résistance polygénique
La distribution limite le panel variétal à 6-7 variétés	Interet de la distribution (nouvelles structures commerciales)
Forte promotion pour des variétés sensibles (Pink Lady®)	Recherche de produits aux qualités non standard.
Goût formaté des consommateurs	Sensibilisation croissante des consommateurs aux conditions de production
Faible qualité (réelle ou supposée) des résistant tavelure	Amélioration de la qualité gustative (Ariane, Goldrush)

Pourquoi les cultivars résistant ne sont pas choisis par les producteurs et pourquoi cette situation pourrait changer dans les années à venir ? (Vanloqueren et Baret, 2005,a)

L'obtention de cultivars transgéniques, bien que probablement de type monogénique, pourrait également être une voie de progrès pour peu que cette orientation soit agréée par la société civile (Vanloqueren et Baret, 2005,b).

Mais autant que la sensibilité propre du cultivar, c'est le comportement du couple agent pathogène / hôte qui doit être pris en compte dans le raisonnement de la lutte. En effet, la tavelure dans un verger présente une variabilité génétique importante, fortement influencée par l'historique phytosanitaire de la parcelle. Une même variété exposée à différentes populations de tavelure aura des comportements très différents.

Ainsi nombre de cultivars jugés peu ou moyennement sensibles lors de leur introduction (Golden ou Jonagold en Belgique) ont été reclassés moyennement ou très sensibles quelques années plus tard (Vanloqueren et Baret, 2005b). Des pratiques phytosanitaires stéréotypées, ou une faible diversité variétale, favorisent une « spécialisation » des souches de *Venturia* alors que la diversité variétale favorise la diversité génétique de la tavelure et tend donc à limiter la sensibilité.

1.3.2. Les moyens de lutte indirects

Toutes les opérations techniques qui tendent à limiter la croissance des pousses ont un effet positif dans la gestion de la tavelure. Une bonne maîtrise de la fertilisation azotée (Leser et Treutter, 2005), mais aussi de l'irrigation ou de la conduite des arbres, sont importantes.

Les relations entre l'architecture des arbres (et des vergers) et la sensibilité à la tavelure ont été explorées par plusieurs auteurs (Kolbe, 1983; Simon *et al.*, 2006 ; Holb, 2005). Ces travaux montrent que la sensibilité à la tavelure est directement reliée à la porosité de la canopée. C'est le passage de l'air entre les organes qui favorise la rapidité de séchage, limitant ainsi la durée d'humectation. Dans ce but, certains de ces travaux (Kolbe, 1983 ; Holb, 2005) ont porté sur la comparaison d'intensité de taille, or ce paramètre influe également sur la vigueur et donc sur l'émission d'organes jeunes, plus sensibles à *V. inaequalis*. Ceci explique sans doute les résultats mitigés de ces auteurs.

La conduite en mur fruitier peut, en ce sens, poser des problèmes puisque la fréquence et les époques de taille sont favorables à une émission d'organes jeunes sur une période plus longue qu'en conduite classique.

L'utilisation de substances stimulatrices de défense naturelle est encore très limitée. Cependant cette piste pourrait présenter un certain nombre d'avantages : origine naturelle des substances, polyvalence

et large spectre d'action, actions non spécifiques, donc à priori plus durables, effet systémique et persistant (Lateur, 2001, Bengtsson *et al.*, 2006). Toutes les techniques qui favorisent l'activité microbienne du sol et donc sont favorables à la dégradation de la litière, peuvent aussi être citées ici : enherbement, maintien du taux de matière organique, engrais vert (Jamar et Lateur, 2005).

1.3.3. Résistance ontogénique

En 1900, Aderhold, cité par MacHardy (1996), fut le premier à noter une différence de sensibilité entre les jeunes et les vieilles feuilles. Schwabe (1979) mit en évidence le phénomène expérimentalement avec des inoculations artificielles d'ascospores et de conidies. Cet auteur a montré que la sensibilité des feuilles augmente fortement à partir de deux jours avant leur étalement pour atteindre un maximum de sensibilité entre deux (pour les conidies) et quatre jours (pour les ascospores) après l'étalement. La sensibilité de la feuille décroît ensuite rapidement pour atteindre une forte résistance après 9 à 13 jours pour les ascospores et 16 jours pour les conidies. A l'automne, les feuilles perdent en partie cette résistance ontogénique, notamment en face inférieure (Olivier et Lespinasse, 1981). Ces attaques d'automne augmentent considérablement le nombre d'organes atteints et la probabilité d'avoir plus d'une tache par feuille, condition nécessaire à une multiplication sexuée. Ainsi les dégâts d'automne sont en grande partie à l'origine de l'inoculum pour le printemps suivant.

La résistance ontogénique influe, non seulement sur le nombre de lésions, mais aussi sur le temps de latence entre la contamination et l'apparition des taches (MacHardy, *et al.*, 2001). Ainsi, plus le tissu infecté est ancien, plus les symptômes sont atypiques et diffus (MacHardy et Gadoury, 1986). La résistance ontogénique semble entraîner une inhibition du champignon, mais celui-ci peut à nouveau s'exprimer avec la baisse de la résistance en cours d'automne. Mais le mécanisme à l'origine de ce phénomène n'est pas connu (MacHardy, 1996).

1.3.4. La lutte chimique

A ce jour, la lutte est quasi exclusivement chimique (Sutton *et al.*, 2000), pourtant il est important de rappeler que la lutte chimique ne peut être qu'un des composants d'une lutte durable contre les bio-agresseurs (Creemers *et al.*, 2002).

L'objectif de la lutte chimique est de passer la période de contamination primaire sans taches dans le verger. Cet objectif atteint, la protection prend fin avec les dernières projections d'ascospores significatives, en général durant la seconde quinzaine de mai dans nos régions. Dans le cas contraire, la lutte est prolongée jusqu'à la récolte.

Le nombre annuel d'applications fongicides pour lutter contre la tavelure varie entre 6 et 20 selon les régions et les années (Giraud et Orts, 2004). Depuis les années 50, une large gamme de fongicides est apparue. Actuellement les molécules homologuées appartiennent à neuf familles chimiques : les inhibiteurs de la biosynthèse des stérols (IBS), les strobilurines, les anilopyrimidines, et six familles de multi-sites. Selon ses caractéristiques propres, chaque produit nécessite un positionnement précis. On distingue quatre types de positionnements :

- Positionnement préventif : avant la contamination.
- Positionnement stop : Le fongicide est positionné entre le moment du début de la pluie contaminatrice et la pénétration de la cuticule par le tube germinatif.
- Traitement curatif : Quand le champignon a pénétré la cuticule et est en phase d'incubation.
- Traitement éradiquant : en présence de taches de tavelure sur feuilles et/ou fruits pour limiter la production d'inoculum secondaire (conidies).

La période de protection va, en général du stade C-C3 de Fleckinger (cf. annexe 7) du pommier (première quinzaine de mars) à la fin des projections d'ascospores (mi à fin mai). Par la suite la protection n'est assurée qu'en cas d'échec de protection sur les contaminations primaires. Le producteur est alors amené à mettre en œuvre une lutte éradicante. Solution séduisante si elle était efficace (Olivier, 1986), cette stratégie s'avère coûteuse en temps, économiquement lourde, et finalement, peu efficace (anonyme, note SRPV aquitaine, 1993). Il est à noter qu'aucun fongicide n'est spécifiquement homologué pour cet usage. De fait, mise en œuvre en situation d'échec, donc en présence de taches, ce positionnement expose particulièrement les substances actives au risque de résistance. Les systèmes d'irrigation sur frondaison en compliquent encore plus sa mise en œuvre. On peut même se poser la question de son utilité durant l'été, vu les fortes températures et la résistance ontogénique du feuillage à cette époque de l'année.

Coûteuse, peu efficace, dangereuse, inutile (?), cette pratique, souvent mal maîtrisée par les services techniques est sans aucun doute la part d'ombre de la lutte anti-tavelure. Il est ici difficile de faire la part des choses entre la mise en œuvre d'une lutte désespérée, mais utile, et une aversion au risque (Aubertot *et al.*, 2005), entraînant des pratiques irraisonnées et souvent inutiles. Ce point mérite probablement un effort de recherche et d'expérimentation.

Du fait du caractère polycyclique de *V. inaequalis*, retarder les premiers traitements comme cela a pu être proposé (MacHardy *et al.*, 1993) est peut-être une erreur. Par contre un arrêt anticipé de la protection en fin de contamination primaire, et en l'absence de taches, peut être une perspective de réduction des traitements intéressante (essais Perlim/Cirea, communiqués par Lompré, non publiés).

1.3.5. Situation sur la résistance de *V. inaequalis* aux fongicides

L'utilisation régulière d'une molécule contre un champignon, entraîne inévitablement à court, moyen ou plus long terme le développement d'une résistance de ce dernier. De ce point de vue, toutes les molécules sont donc plus ou moins en sursis. La durée de ce sursis dépend, entre autre, du (des) mode(s) d'action de la molécule, de la fréquence d'utilisation sur le champignon, du stade biologique auquel le champignon a été exposé (Leroux, 2003). Par ailleurs le contexte social et écologique est peu favorable à l'homologation de nouvelles substances. On peut penser que cette tendance va aller croissant et de fait, les molécules susceptibles de prétendre à une homologation dans les années à venir, ne sont pas nombreuses (Aubertot *et al.*, 2005). Dans le cadre d'une lutte raisonnée contre la tavelure, la prise en compte de ces paramètres devient donc un élément majeur du raisonnement. A ce jour, plusieurs familles de fongicides sont plus ou moins en difficultés en verger, on peut citer les inhibiteurs de la synthèse des stérols (IBS), les strobilurines mais aussi dans une moindre mesure les anilino-pyrimidines.

1.3.5.1. Les fongicides inhibiteurs respiratoires

- **Les fongicides multisites.**

Dans ce groupe, plusieurs familles sont représentées, parmi les substances actives homologuées, on peut citer : **le captane, le mancozèbe, le dithianon, le thirame, le zirame, le manèbe, le tolylfluamide, le soufre, le cuivre.**

La caractéristique commune de ces molécules est d'avoir plusieurs sites d'action sur le champignon. Certaines sont plus efficaces que d'autres, mais jusqu'à récemment, aucun cas de résistance n'avait été mis en évidence. En 2003-2004, en val de Loire, des cas d'échec en verger, non explicables avec les éléments techniques habituels (Huberdeau, comm. personnelle), ont laissé penser que certains multisites pouvaient être mis en cause. Des travaux sont en cours pour préciser ce point.

Quels que soient les résultats de ces études, ces cas rappellent que malgré leur robustesse les produits multisites ne sont pas invulnérables, leur utilisation répétée est donc impérativement à éviter. Malgré tout, la sélection stabilisatrice peut laisser espérer que des éventuelles résistances à des produits multisites pourront être réversibles en cas de non-utilisation de la substance active contournée (ou de la famille chimique) pendant quelques années. La sélection stabilisatrice est le fait qu'une souche possédant une virulence non nécessaire pour coloniser un hôte, tend à disparaître puisque l'énergie mise en œuvre par cette souche pour acquérir cette virulence la rend moins compétitive (Van Der Planck, 1968). La résistance aux multisites pouvant être particulièrement « coûteuse » pour le champignon, on peut espérer un retour de la sensibilité plus ou moins rapidement.

- **Les strobilurines (QOI)**

Deux substances actives homologuées dans cette famille, **le kresoxim-méthyl et la trifloxystrobine** Disponibles sur pommier depuis seulement 1998 en France, cette famille est déjà contournée par *V. inaequalis*. La résistance aux QOI s'acquiert de façon disruptive. Ainsi, en une saison l'efficacité pratique peut passer d'un niveau très satisfaisant à un niveau très insuffisant. La mutation sur le cytochrome b du gène G143 A, connue depuis plusieurs années en Pologne, est apparue en France au cours de la campagne 2004, notamment sur les secteurs du Tarn et Garonne et du Languedoc. A ce jour, la résistance est observée dans presque toutes les régions de production à l'exception du val de Loire. L'usage de cette famille est donc limité (dans les cas où la résistance n'est pas encore avérée) à la fin des contaminations primaires, période à laquelle le risque est plus limité pour la tavelure. L'intérêt des strobilurines sur oïdium demeure, à ce jour, intact.

1.3.5.2. Les fongicides inhibiteurs de la biosynthèse des stérols (IBS)

Neuf substances actives sont homologuées contre la tavelure dans cette famille, **le cyproconazole, le difenoconazole, le fénarimol, le fenbuconazole, le flusilazole, l'hexaconazole, le myclobutanil, le fluquiconazole, et le tebuconazole**. Auxquels, il faut ajouter les produits homologués uniquement sur oïdium : **le tetraconazole, le bitertanol, et le penconazole**. Les neuf produits homologués sur tavelure appartiennent tous au Groupe 1 ou DMI dont le mode d'action est l'inhibition de la 14 α déméthylase. Le fort historique d'utilisation de cette famille a entraîné au fil du temps une érosion de l'efficacité (résistance progressive), conséquence de l'acquisition de gènes mutés au cours des cycles successifs de reproduction sexuée (Parisi et Guillaumes, 1990).

Bien que la résistance soit croisée entre les différentes substances actives, des niveaux de résistances très différents ont été mesurés (Micoud, et Remuson, 2006). Ces auteurs préconisent donc une utilisation alternée des différentes substances. L'importance de « l'érosion » de l'efficacité d'une molécule est souvent reliée à l'ancienneté de sa mise en marché (Bréniaux, comm. personnelle).

En cas d'échec de traitement (résistance avérée) la suppression de cette famille, y compris contre l'oïdium, au moins un an sur deux peut permettre de retrouver une efficacité pratique (Micoud et Remuson, 2006).

Les préconisations pour ces produits sont de quatre applications par an maximum (IBS anti-oïdium compris). Positionnés dans les 72 heures qui suivent la contamination, associés obligatoirement à un produit de contact. On rappellera qu'en Europe il est couramment admis que les IBS sont peu efficaces pour une température inférieure à 12°C mais les chercheurs américains ne semblent pas d'accord sur ce point (Philon, comm. orale).

1.3.5.3. Les fongicides affectant la biosynthèse des acides aminés ou des protéines : Les anilinopyrimidines (ANP)

Deux substances actives homologuées dans cette famille, **le cyprodinil et le pyrimethanil**.

Les molécules de cette famille agissent sur la biosynthèse de la méthionine et la sécrétion de protéines enzymatiques (Micoud et Remuson, 2006). Bien que mises en marché récemment contre la tavelure (?), les sociétés détentrices de ces molécules (Syngenta et BASF) reconnaissent déjà, de façon non officielle, des cas de baisse d'efficacité au champ (note nationale tavelure 2006).

Pour les ANP, le type de développement de la résistance semble être plus comparable à celui observée pour les IBS (type progressif) que pour les strobilurines (type disruptif) (Gisi, société Syngenta, comm. orale). Mais ce point ne semble pas encore être complètement établi (Micoud et Remuson, 2006).

Les préconisations concernant les ANP ne sont pas encore complètement claires non plus. Ces substances étant non lessivables mais peu efficaces préventivement sur fruits, les sociétés les ont naturellement préconisées avant fleur en préventif, à la période de plus gros risque climatique. Or des travaux, en Belgique notamment (Creemers, 1996) ont montré que cette famille pouvait être utilisée avec avantage en post contamination, associée à un produit de contact. Ce positionnement présente un grand intérêt en situation d'échec avec les IBS et par basse température (<12°C). Jusqu'à récemment ce positionnement n'était pas recommandé pour deux raisons, (i) du fait de la législation sur les mélanges à venir (arrêté publié au J.O. du 13/03/06), (ii) du fait de l'incertitude sur les conséquences de ce positionnement sur l'évolution de la résistance (Leroux, 2003). Depuis début avril 2006 la société BASF préconise officiellement l'utilisation du Sari (pyrimethanil) en mélange avec du Delan (dithianon) pour un positionnement post-contamination. D'une manière générale l'utilisation maximale d'ANP doit être limitée à 3 par ans.

1.3.5.4. Les fongicides inhibiteurs de la division cellulaire : Les benzimidazoles

Apparue en France dans les années 70, la résistance disruptive et persistante est maintenant généralisée pour cette famille (Micoud, 2002). En France, aucun produit n'est actuellement homologué en verger contre la tavelure.

1.3.5.5. La dodine (Guanidines)

Ses deux sites d'action donnent à cette substance active une relative robustesse. Mais son utilisation irraisonnée en Amérique du nord a été à l'origine d'apparition de résistances dans les années soixante (Sholberg *et al.*, 1989 ; MacHardy, 1996; Köller *et al.*, 1999).

En France le prix du produit commercial a longtemps limité son usage à un positionnement éradiquant. Depuis quatre ans, la société détentrice de la molécule insiste pour que la dodine soit exclusivement positionnée préventivement et en absence de taches. Malgré les pratiques antérieures, il semblerait qu'à ce jour, aucun cas de résistance ne soit connu en Europe (Cornette, société Chimac-Agriphar, comm. personnelle).

Les préconisations pour ce produit sont de trois applications par an maximum.

1.3.6. Outils d'aide au raisonnement de la lutte : la modélisation

1. Modélisation de la maturité des périthèces et des ascospores

Holtz en 1939, cité par MacHardy (1996), a été le premier à utiliser les sommes de température pour prévoir le début des contaminations primaires. Mais la modélisation de la maturité des périthèces n'est pas encore au point. Beaucoup de travaux ont porté sur l'influence de paramètres isolés, mais très peu ont eu pour objet l'influence globale de ces différents paramètres (MacHardy, 1996).

En France, la date de maturité des périthèces est fixée par observation visuelle selon un protocole défini par Marie Paule Lagarde (1988) (cf. annexe 8). Cette date est utilisée comme « J0 » pour l'initialisation des courbes de maturation dans le modèle mathématique utilisé par les Avertissements agricoles en France. Cet auteur a déterminé deux courbes de maturation des ascospores selon que la somme des températures hivernales (en base 0°C) est supérieure ou inférieure à 650°C entre le 1^{er} décembre et le 28 février (Lagarde, 1988).

La maturité des ascospores suit une loi normale dont l'étalement est défini par les sommes de températures journalières (en base 0°C).

Pour le modèle RIMpro, étant donné le manque de connaissance des facteurs qui peuvent influencer le début des projections depuis la maturité des spores, c'est la date de la première projection (Biofix) qui fixe le départ de la courbe de maturation des ascospores (Trapman, M., comm. pers).

Le pic de maturité des ascospores coïncide sensiblement avec le moment où la surface réceptive de l'hôte est maximale. En effet, la surface sensible augmente avec la mise en place de la surface foliaire et atteint un maximum approximativement à la chute des pétales. À partir de ce moment, la résistance ontogénique progresse plus vite que l'augmentation de surface foliaire. La surface sensible commence alors à décroître.

Plusieurs équipes de recherche collaborent pour tenter de modéliser la date du biofix à partir de données météo hivernales enregistrées dans la litière des feuilles.

2. Modélisation des contaminations

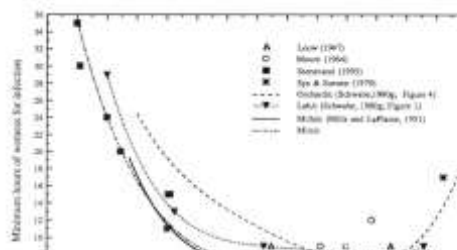
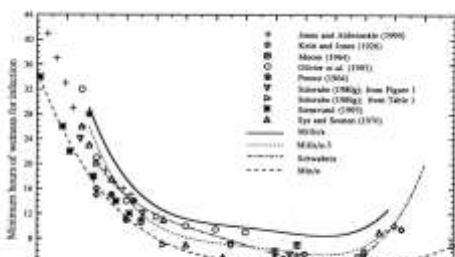
Mills et LaPlante (1951), ont proposé un modèle de prévision des risques de tavelure prenant en compte la température et le nombre d'heures d'humectation. Ces auteurs ont pu ainsi définir trois courbes de risque croissant. Ces courbes précisent le nombre d'heures d'humectation des feuilles de pommier nécessaires à une température donnée, pour qu'une contamination faible, moyenne ou grave se réalise pour un cultivar très sensible, avec un inoculum fort. Leur application constitue le premier système d'avertissement et d'exécution des traitements faisant intervenir l'évaluation des risques (MacHardy et Gadoury, 1989).

Très utilisées, les courbes de Mills et LaPlante décrivent le « risque climatique » et présentent des lacunes à l'origine de leur révision :

- Elles sont peu performantes en situation climatique instable (humectation discontinue).
- Elles ne prennent pas en compte le niveau d'inoculum présent à l'automne.
- Les ascospores nécessitent moins de temps pour provoquer une infection que les conidies (environ 3 heures de moins).
- Elles ne prennent pas en compte la périodicité de projection des ascospores (diurne / nocturne).
- Elles ne tiennent pas compte de la phénologie de l'arbre et de la réceptivité des tissus.

À la même époque en France, Olivier propose d'intégrer au modèle la prise en compte de l'humidité relative entre deux périodes courtes d'humectation (Olivier, 1983), l'importance de l'inoculum d'automne (Olivier, 1984), l'intensité des projections d'ascospores et la sensibilité variétale (Olivier, 1986). Par ailleurs cet auteur a proposé pour la région d'Angers une modification de la courbe de Mills prenant en compte, pour cette région, la possibilité d'infection dans des conditions inférieures à celles de la courbe de Mills et LaPlante (Olivier, 1983). L'utilisation de cette courbe est toutefois réservée aux vergers à inoculum très important.

MacHardy et Gadoury (1986), ont été les premiers à proposer une révision des courbes de Mills qui prenne en compte les périodes d'humectation foliaire diurnes et nocturnes. Ces mêmes auteurs, déduisant du point précédent que Mills et LaPlante avaient sans doute majoré les temps nécessaires à une contamination, ont proposé une courbe minorée de 3 heures par rapport à la courbe de Mills



« risque léger ». Cette courbe est appelée « Mills a-3 » pour les ascospores et « Mills-c » pour les conidies. Ce sont ces dernières courbes qui font référence à ce jour (figure3).

Figure 3 : Conditions de contamination par les ascospores et les conidies

Conditions de contamination selon les conditions de température et de durée d'humectation pour différents auteurs et situations géographiques. A gauche, ascospores, à droite, conidies (MacHardy, 1996).

3. Les modèles mathématiques de développement de *V.inaequalis*

Il existe deux grands types de modèles (Rouzet et Vibert, 2000):

- Les modèles globaux (empiriques), pour lequel le système épidémique est considéré comme trop complexe pour être décrit en détail. Seuls les flux d'entrée et de sortie sont pris en compte (climatologie et niveau de maladie).
- Les modèles analytiques (mécanistes), pour lesquels chaque phase du développement du pathogène est décrite. Ces modèles sont beaucoup plus complexes à mettre au point et peuvent parfois aboutir à des graves erreurs d'interprétation tant que la biologie du pathogène n'est pas suffisamment connue.

Avec la vulgarisation de l'informatique, de nombreux modèles ont été développés dans le monde. En France, suite aux travaux de Marie Paule Lagarde, dans les années 80, le service de la protection des végétaux a développé le modèle Taveco[®] (puis Melchior[®]).

Depuis quelques années, le modèle RIMpro, développé par Marc Trapman aux Pays Bas, s'est imposé comme la référence dans de nombreux pays européens et nord américains. (Giraud et Trapman, 2006). Ce modèle propose un indice de risque, le RIM (Relative Infection Measure). Le RIM correspond à une proportion d'ascospores qui ont pu germer et infecter la feuille. La pertinence de cet indice a été validée par la station d'expérimentation du Laimbourg au Sud-Tyrol (Giraud et Trapman, 2006). La possibilité d'utilisation de cet indice comme seuil de déclenchement de traitement est en cours de discussion et d'expérimentation.

Mais deux problèmes majeurs se posent avec les stations météorologiques : la fiabilité des mesures et la représentativité des mesures. Même s'ils l'auraient mérité, ces points ne seront pas plus développés ici, mais ces deux notions devraient toujours rester à l'esprit des utilisateurs de modèles.

L'humectation est très certainement le paramètre le plus fragile parmi ceux utilisés pour les modèles tavelure (et autre d'ailleurs). La mesure pourrait dans l'avenir être remplacée par la modélisation (modèle SWEB / Margarey ou LEAFWEAT / Wittich) en fonction des autres paramètres climatiques (pluie, hygrométrie, température et vent) et de paramètres culturaux (Creemers, 2005).

Un débat de spécialiste concerne également le positionnement des capteurs d'hygrométrie et/ou de température, un positionnement directement dans la litière pouvant être plus pertinent (Triloff, non publié), mais ce point ne semble pas encore tranché.

Les limites des modèles mathématiques.

Comme vu précédemment, la fiabilité et la représentativité des mesures climatologiques sont sans doute les premières limites des modèles mathématiques.

La robustesse d'un modèle (quelle que soit la situation, il ne conduit pas à une erreur d'interprétation grave) est la qualité première d'un modèle. Mais la recherche de la précision (mise en évidence de différences significatives entre des situations proches) est une évolution naturelle pour un modèle (Rouzet et Foulon, 2003). Pratiquement, ces deux notions sont pourtant difficiles à concilier et la recherche de l'une entraîne souvent la perte de l'autre.

Certains modèles, c'est le cas de RIMpro, ont été conçus dans des pays où les conditions climatiques peuvent être notablement différentes de l'endroit où le modèle est utilisé. Une validation des résultats est donc impérative. Cette validation peut être réalisée en comparant les sorties du modèle aux projections biologiques d'ascospores sur plusieurs années. Ce travail est en cours pour RIMpro dans le cadre du « Groupe de Travail National Tavelure » coordonné par Michel Giraud du Ctifl.

Quoi qu'il en soit, il ne faut jamais perdre de vue qu'un modèle n'est qu'un outil, utile certes, mais qui ne peut pas remplacer l'observation et la connaissance du terrain.

Modèles de simulation de développement de la surface foliaire.

L'adaptation de la pulvérisation à la surface foliaire et notamment à la surface sensible est une voie de progrès probable pour les années à venir. A ce jour peu de travaux portent sur ce sujet si ce n'est en Belgique, où la station royale de Gorseme s'intéresse depuis quelques années à ce sujet (Creemers *et al.*, 1996). D'autres chercheurs de cette station ont développé un système de mesure de la surface foliaire par photographie « fisheye » (Jaeken *et al.*, 2004). Mais, à notre connaissance, aucun véritable modèle de mise en place de la surface foliaire n'est à ce jour disponible.

Transfert au verger

L'utilisation des modèles est devenue extrêmement courante, sinon dans les exploitations, au moins dans la gestion des réseaux d'avertissement (Huberdeau et Geoffrion, 1998).

La prise en compte de courbes de contaminations différentes selon la quantité d'inoculum, de la sensibilité variétale et de la quantité d'ascospores projetable avait été proposée par Jean Marc Olivier dès le milieu des années 1980 (Olivier, 1983, 1984, 1986).

En 1995, en val de Loire, Michel Lefeuvre (1995), a montré qu'il était raisonnablement possible d'obtenir une réduction du nombre de traitements fongicides significative en appliquant ces concepts. Malheureusement, le manque d'équipement en stations météorologiques et le développement de nombre de variétés (très) sensibles n'a pas favorisé la vulgarisation de la technique.

Pour certaines variétés, moyennement ou peu sensibles à la tavelure, comme Granny smith ou Reine des Reinettes, les programmes de lutte pourraient très probablement être allégés, avec ou sans prophylaxie selon l'inoculum (MacHardy, 2000).

Mais un des enjeux majeurs des réseaux d'avertissement tavelure de l'avenir est sans doute la qualité des prévisions météorologiques (Creemers, 2005). A ce jour l'utilisation de modèles sur des données climatiques prévisionnelles (techniquement possible avec certains modèles) est encore trop aléatoire. Cette perspective laisse entrevoir une approche de la lutte beaucoup plus fine. L'incertitude météorologique est aussi souvent à l'origine de traitements inutiles en vergers.

1.4. Travaux antérieurs portant sur la prophylaxie : principes et techniques

« La prophylaxie est définie comme tout acte technique contre un phyto-agresseur destiné à réduire ou éliminer la production, le développement (ou la présence) d'inoculum primaire avant qu'il puisse infecter les tissus sensibles » (MacHardy, 1996).

Dans la note nationale tavelure de 2003, cosignée par l'INRA et la DGAL-SDQPV, la prophylaxie est signalée comme devant faire partie intégrante de la lutte contre la tavelure. Pourtant, à ce jour la prophylaxie en matière de tavelure est tout à fait balbutiante malgré le nombre de références scientifiques sur le sujet. La succession d'années difficiles depuis 1999 (Huberdeau, 2002) a toutefois encouragé quelques producteurs à s'intéresser au broyage de la litière (surtout en val de Loire) et quelques autres aux pulvérisations d'urée (surtout dans le sud-est).

En culture de pommier à cidre des expériences très intéressantes sont menées depuis 2001. Dans les vergers une lutte prophylactique est mise en œuvre et l'inoculum est contrôlé à l'automne. En cas de faible inoculum, aucun traitement n'est réalisé au printemps suivant. Cette stratégie semble satisfaire les producteurs (Dupont *et al.*, 2006).

Même si les cultivars utilisés pour la production de cidre sont en moyenne peu sensibles à la tavelure et que le seuil de tolérance y est largement plus bas qu'en pomme à couteau, cette expérience devrait inspirer nos démarches futures.

Une des raisons citées par MacHardy (2000), de la non généralisation des techniques prophylactiques est que la plupart des essais faits dans le monde, l'ont été en situation de fort, voire de très fort inoculum. De ce fait, les résultats, bien que souvent significatifs au sens statistique du terme, étaient probablement trop peu démonstratifs pour emporter l'adhésion des techniciens et producteurs.

1.4.1. Actions physiques sur la litière hivernante

Elles consistent à supprimer la litière hivernante en retirant les feuilles du verger, en les enfouissant ou en les brûlant. La décomposition de la litière peut aussi être accélérée en broyant les feuilles.

Dès le milieu du XIX^{ème} siècle, les arboriculteurs avaient déjà mis en relation la litière hivernante et les attaques de tavelure de printemps. En effet à cette époque, il était couramment recommandé de ramasser et brûler les feuilles ou de réaliser des traitements à l'automne (Scribner, 1886 et 1888 cité par Sutton *et al.*, 2000). Pourtant, ce n'est qu'en 1924 qu'une étude néo-zélandaise mit en évidence expérimentalement le phénomène (Curtis, 1924 cité par MacHardy, 1996). Dans les années 30 et 40 un grand nombre de travaux ont été faits sur les techniques prophylactiques. Jusque dans les années 1940, l'objectif affiché de la lutte prophylactique était l'éradication de la tavelure dans le verger. Les auteurs proposent de brûler ou d'enfouir la litière (Keitt, 1930, 1935 ; Keitt et Palmiter, 1937 ; Palmiter, 1940, 1946). Autour des années 50, en Afrique du sud, Louw (1948, 1951), confirme ces résultats.

L'efficacité du broyage pour réduire l'importance des projections d'ascospore au printemps suivant a été clairement mise en évidence par Sutton aux USA (Sutton, 1992, cité par MacHardy, 1996 ; Sutton et MacHardy, 1993 ; Sutton *et al.*, 2000). Les différents travaux de cet auteur montrent que le broyage peut réduire de 40 à 90% les projections d'ascospores. Plus récemment des travaux canadiens (Vincent *et al.*, 2004) ont confirmé ces résultats. L'action du broyage n'intervient sans doute pas directement

sur les périthèces puisque aucun broyage n'est assez fin en regard de leur taille (90 à 150 μ)(Vincent *et al.*, 2004).

Il est donc probable que ce soit l'accélération de la dégradation de la litière qui est à l'origine de l'efficacité de la méthode. Cet effet a parfois été favorisé par l'utilisation de stimulateurs de dégradation (dont la composition n'est pas clairement donnée par la publication) pour accélérer la décomposition de la litière (Creemers *et al.*, 2002). Mais il semble que ce point n'ait jamais été véritablement démontré.

Effet annexe, mais tout à fait intéressant, le broyage de la litière à l'automne permet une très bonne régulation des populations de mineuses marbrées, *Phyllonorycter blancardella* (Vincent *et al.*, 2004). Ravageur occasionnel de nos vergers, la mineuse marbrée hiverne sous forme de pupe dans les feuilles minées (Pottinger et Leroux, 1971 cités par Vincent *et al.*, 2004). Les essais menés par ces auteurs ont montré que le broyage, notamment en favorisant le travail d'enfouissement par les vers de terre, réduisait les émergences de *P. blancardella* de l'ordre de 90 %.

L'andainage et le broyage d'automne ont aussi un effet non négligeable (mais non étudié) sur les dynamiques de population de campagnols (obs. pers.). Les fruits restés au sol après la récolte constituant une base alimentaire importante juste avant la période de multiplication de ce ravageur.

Mais ces exemples positifs d'effets non intentionnels du broyage laissent inévitablement entrevoir la possibilité que des organismes utiles dont le cycle est lié d'une manière ou d'une autre à la litière hivernante puissent être également détruits par broyage.

Une étude a récemment démontré l'intérêt de l'enfouissement de la litière sur le rang, couplé au balayage de l'inter-rang (Gomez, *et al.*, 2006).

D'après Sutton *et al.* (2000) les conditions d'efficacité de la prophylaxie d'automne seront optimales (i) s'il y a suffisamment de temps entre la chute des feuilles et le début des conditions hivernales (ii) si l'hiver est doux, (iii) s'il n'y a pas ou peu de neige, (iv) si l'hiver n'est pas trop sec. L'efficacité de cette technique est d'autant meilleure que le broyage est fin. Le brûlage, le retrait, l'enfouissement ou le broyage de la litière ont toujours montré une efficacité proportionnelle à la qualité de la réalisation (MacHardy, comm. pers.).

1.4.2. Le rôle de décomposition des micros et macros organismes du sol

Bien que pouvant aussi être classé dans les actions biologiques, le rôle des vers de terre est aussi une action physique. Raw (1962) a démontré le rôle extrêmement important des vers de terre sur la dégradation de la litière hivernante. Cet auteur a montré que dans des vergers très colonisés par les vers de terre (en sols travaillés), ceux-ci pouvaient enterrer jusqu'à 90 % de la litière. Ces travaux ont été repris et confirmés par Niklas et Kennel (1981). En verger enherbé, le grand nombre de déchets organiques offre plus de choix aux vers de terre. MacHardy propose donc de maintenir l'enherbement le plus ras possible après la chute des feuilles (MacHardy, 1996). Le broyage de la litière à l'automne, présente donc le double intérêt de détruire partiellement le support physique de *V. inaequalis* et de limiter le choix des vers de terre pour leur alimentation et ainsi favoriser la dégradation de la litière.

A contrario, un certain nombre de pesticides ont des effets très négatifs sur les vers de terre. Les effets du cuivre sont assez bien connus (Niklas et Kennel, 1981 ; Creemers, 1990), mais on peut citer aussi d'autres molécules comme le carbaryl utilisé en éclaircissage chimique, les insecticides diméthoate et endosulfan, les fongicides thiophanate méthyl et bénomyl, couramment utilisés en pré-récolte sur maladies de conservation (Cook *et al.*, 1973). La toxicité de ces derniers sur vers de terre est très importante et leurs effets négatifs sur la décomposition de la litière, d'autant plus grande que leur utilisation est proche de la chute des feuilles. D'autres molécules sont suspectées mais à ce jour les études restent contradictoires. Il s'agit des insecticides fenitrothion, deltaméthrine et chlorpyrifos-ethyl (e-phy, 2007). Un certain nombre d'autres molécules, comme l'endosulfan ou le diméthoate sont cités, mais sont déjà en voie de perte d'homologation.

Dans le cadre du programme Européen REPCO (étude sur les alternatives au cuivre en Agriculture biologique), Bart Heijne (travaux en cours), de la station de Wageningen (NL) étudie l'efficacité des vers de terre sur la décomposition de la litière et les paramètres qui influent sur leur activité. Ces travaux montrent notamment que la mortalité des lombrics est plus importante sous des climats secs et chauds, lors des inondations, avec des sols très argileux ou sableux et de pH inférieurs à 4,5. Le cuivre et les benzimidazoles sont également très défavorables. Néanmoins, bien que le cuivre soit très utilisé en agriculture biologique, dans une série d'essais en vergers de production, Holb (2006), a montré que la réduction d'ascospores produites par mètre carré de litière était jusqu'à quatre fois plus importante dans un verger conduit en agriculture biologique que dans un verger conduit en production intégrée. Cet auteur attribue cette différence à une meilleure activité biologique du sol.

Dans ce contexte, le choix des pesticides pour les parties aériennes, mais aussi et surtout des herbicides doit également être raisonné en fonction de leurs effets secondaires éventuels sur la faune du sol et particulièrement les lombricidés (Cook *et al.*, 1973). La phrase de risque R56 (toxique pour les organismes du sol) doit donc être un des critères de choix des produits (quand le choix existe ...).

L'étude des relations entre gestion du sol en verger, conservation de la litière et projection d'ascospore a été peu étudiée mais peut être une piste de travail intéressante. En effet d'autres modes de gestion de la bande de plantation pourraient, tout en fixant une partie de l'azote susceptible d'être lixivié pendant l'hiver, favoriser une vie microbienne très favorable à la décomposition des feuilles hivernantes. Une étude a montré l'intérêt d'apport de mulch ou de compost sur les populations d'arthropodes et la réduction de certains phyto-agresseurs (*Phyllonorycter blancardella* et *Eriosoma lanigerum*) mais aucun effet n'a été noté sur *V. inaequalis* (Brown et Tworkoski, 2004).

1.4.3. Actions biologiques sur la litière hivernante

1- Gestion de la flore épiphyte

Le feuillage des pommiers supporte une microflore (phyllosphère) dont certaines populations bactériennes qui sont naturellement antagonistes de *V. inaequalis*. La plus connue d'entre elles est *Pseudomonas fluorescens*. Si la gestion de la flore épiphyte est encore assez peu explorée (Ross, 1953, cité par Carisse et Dewdney, 2002 ; Fiss *et al.*, 2000), elle n'en constitue pas moins une très probable voie de progrès pour les décennies à venir (Rapilly, 1991 ; MacHardy, 1996). Mais le manque de connaissances sur le sujet et les blocages de tous ordres (techniques, économiques, psychologiques, ...) sont sans doute pour l'instant encore trop forts pour envisager cette piste avec quelques chances de succès (MacHardy, 1996). On peut noter qu'une étude comparative des phyllosphères entre des vergers peu ou pas traités et des vergers intensivement traités serait probablement intéressante, et pourrait peut-être apporter une explication aux différences de comportement de la tavelure vis-à-vis de ces modes de conduite.

Les premières tentatives d'induction de résistance par des micro-organismes ont été faites par Caruso et Cody (1984) avec *Pseudomonas fluorescens* contre *V. inaequalis* au printemps mais sans grand succès. Certaines publications font état de recherches dans cette voie (Fiss *et al.*, 2000 ; Carisse et Dewdney, 2002 ; Prikshayat *et al.*, 2004), mais cette piste reste encore en grande partie à explorer.

2- Utilisation de micro-organismes antagonistes : deux types d'effets

- **Effet antagoniste vis-à-vis de *V. inaequalis***

Durant les quatre semaines qui suivent la chute des feuilles, *V. inaequalis* est dans une phase critique pour son développement. Entrant dans sa phase sexuée, le mycélium doit croître dans la feuille dans un contexte de forte compétition alimentaire avec les autres micro-organismes. Ces micro-organismes, bactéries ou champignons, peuvent être naturellement présents sur le feuillage (*Pseudomonas*

fluorescens, *Cladosporium*,...) ou amenés par pulvérisations (*Athelia bombacina*, *Microsphaeropsis ochracea*) (MacHardy, 1996 ; Thakur et Sharma, 1999 ; Fiss *et al.*, 2000 ; Carisse *et al.*, 2000 ; Fiacadorri et Cesari, 2000 ; Cesari, 2001 ; Carisse et Bernier, 2002 ; Carisse et Dewdney, 2002 ; Prikshayat *et al.*, 2004 ; Vincent *et al.*, 2004). A ce jour, aucun de ces micro-organismes n'est encore commercialisé.

On notera ici l'observation de Bezut et Bernaux (1966) dans la région de Montpellier. Ces auteurs avaient noté que quand les feuilles étaient colonisées par *Alternaria*, *Cladosporium*, *Pleospora herbarum*,... peu ou pas de périthèces de tavelure étaient observés.

▪ Effet de décomposition de la litière

Des feuilles traitées avec *Athelia bombacina* à l'automne, présentaient au printemps suivant une moindre rigidité et 10 à 50 % de poids en moins (Heye et Andrews, 1983). L'une des caractéristiques de *Pseudomonas sp.* est de synthétiser des enzymes pectinolytiques entraînant une altération accélérée de la litière (Cross *et al.*, 1968). Mais les mêmes auteurs soulignent que la réduction des projections d'ascospores est sans doute bien plus liée à l'effet inhibiteur de cette bactérie sur *V. inaequalis*, qu'à son effet intrinsèque de dégradation de la litière.

1.4.4. Actions chimiques sur la litière hivernante

1- Application de fongicides à la chute des feuilles

Dès 1937, la possibilité d'utiliser des fongicides à la chute des feuilles a été étudiée (Keitt, Palmiter, 1937 ; Keitt *et al.*, 1941). En 1975, une importante étude (Darpoux *et al.*, 1975) reprend les résultats de nombreux auteurs sur l'efficacité des produits chimiques utilisés comme éradiquants à la chute des feuilles. Cette étude confirme l'efficacité d'un grand nombre de pesticides. Parmi les produits testés les plus efficaces on peut citer : le bénomyl, le carbendazime, le thiabendazole, le méthyl-thiophanate, le triarimol, le sulfate d'ammonium. D'autres travaux ont confirmé ces résultats avec les IBS (Biggs et Warner, 1990) avec toutefois un résultat surprenant pour le bitertanol qui favorisait la production d'ascospores de plus de 50%. Une autre étude a montré l'efficacité de plusieurs herbicides sur les projections d'ascospores (Yoder et Klos, 1982). Avec le 2,4-D (acide dichloro-2,4-phénoxy acétique) par exemple, les projections ont été réduites de plus de 60%. Ces résultats ont conduit les auteurs de cette étude à proposer une application en plein de cette hormone au début du printemps pour limiter la flore adventice tout en limitant les projections d'ascospores de tavelure. Des résultats sensiblement équivalents ont été obtenus avec le paraquat (MacHardy, 1996).

A contrario, l'utilisation de produits de contact classiques (captane, cuivre) à l'automne s'est avérée néfaste. Il semblerait que des antagonistes de *V. inaequalis* soient détruits par le fongicide mais pas le parasite, engendrant ainsi une augmentation de volume d'ascospore projetable de 30 à 40% par rapport au témoin (Olivier, 1986).

Quoi qu'il en soit, ces pratiques n'ont jamais été encouragées du fait des risques trop importants de développement de résistances (Keitt *et al.*, 1941 ; Biggs et Warner, 1990). En effet les recombinaisons génétiques durant la phase sexuée du champignon favorisent grandement l'apparition de souches résistantes.

2- Utilisation de surfactants et autres substances

Une étude de Burchill et Swait (1977) met en évidence un effet très important d'adjuvants pulvérisés à la chute des feuilles sur la production d'ascospores. Si le fait que les feuilles aient été trempées a pu amplifier artificiellement les résultats, la piste est peut-être malgré tout à retenir. MacHardy dans sa monographie de 1996 cite de nombreuses substances ayant fait preuve de plus ou moins d'efficacité. Parmi les plus efficaces, on peut citer : le cyanamide d'hydrogène, le nitrite de sodium, le sulfate d'ammonium (au sol au printemps) et un certain nombre d'autres substances azotées (MacHardy,

1996). Plusieurs extraits de plantes ont aussi été testés, parmi lesquels des extraits de lierre (*Hedera helix*), de l'huile de soja émulsifiée associée à de l'Agral 90 (Carisse et Dewdney, 2002) ou des extraits de Yucca (Bengtsson *et al.*, 2006).

1.5. Réduction de l'inoculum par pulvérisation d'urée

1.5.1. Historique des travaux

Cette technique est à la fois chimique et biologique. Connue depuis plus de quarante ans, ce moyen de lutte prophylactique est souvent cité par les auteurs mais finalement assez peu mis en œuvre par les producteurs.

Les premiers travaux portant sur l'utilisation de l'urée comme moyen de lutte contre la tavelure ont été faits en Angleterre dans les années 60-70. Ross, suite à ses travaux sur la phyllosphère des feuilles de pommier (Ross, 1953, cité par Carisse et Dewdney, 2002) a mis en relation la teneur en azote et le développement des périthèces de *V. inaequalis* (Ross, 1961). Ses travaux, repris par d'autres chercheurs, notamment Anglais ont été à la base de l'essentiel des connaissances sur ce sujet (Oland, 1963, cité par Carisse et Dewdney, 2002 ; Burchill *et al.*, 1965 ; Cross *et al.*, 1968 ; Ross et Burchill, 1968 ; Cook, 1969 ; Meszka et Bielenin, 2001).

Burchill *et al.* (1965) montrent que la pulvérisation d'urée (ou le trempage, en laboratoire) réduisent fortement la production de périthèces. Mais ces auteurs ne peuvent pas dire si cette réduction est liée à l'augmentation de la teneur en azote dans la feuille ou à l'intense activité bactérienne qu'ils observent. En 1968, Crosse *et al.* en arrivaient aux mêmes conclusions. Ces derniers auteurs ont montré que l'adjonction de glucose à l'urée en augmente l'efficacité. Le glucose n'intervenant que sur la multiplication des micro-organismes (par apport de carbone), ce résultat confirme l'effet antagoniste de la microflore sur *Venturia inaequalis*. Mais l'urée appliquée sur des périthèces mûres rend également les ascospores non viables (Ross et Burchill, 1968).

Burchill et Cook (1971) montrèrent que l'urée stimulait la sporulation de nombreux champignons, parfois antagonistes de *V. inaequalis*, et que les populations de bactéries et de levures étaient 20 fois plus importantes, sur les feuilles, 39 jours après qu'elles aient été détachées de l'arbre et trempées dans une solution à 5% d'urée par rapport à un témoin non traité. Les mêmes auteurs montrèrent que l'urée influait non seulement sur la quantité de micro-organismes mais également sur les équilibres entre espèces.

Entre 1994 et 1996, des auteurs polonais (Ciecierski *et al.*, 1995, Cimanowski *et al.*, 1997), ont réalisé une série d'expériences en vergers commerciaux, confirmant ainsi l'intérêt technique des pulvérisations d'urée au-delà du laboratoire.

L'utilisation de l'urée comme moyen de lutte contre la tavelure, a aussi été très étudiée dans les pays en voie de développement du fait de son prix raisonnable et son faible impact sur les organismes non-cibles (Thakur et Sharma, 1998).

En limitant l'importance de la phase sexuée du champignon, l'urée (comme le broyage) contribue à limiter le risque de développement de résistances aux fongicides (Biggs, 2004).

1.5.2. Modes d'action de l'urée

1. Toxicité directe de l'urée sur périthèces, mycélium, ascospores et conidies

La pulvérisation d'urée, juste avant la chute des feuilles, entraîne une élévation significative (> x2) de la teneur en azote dans la feuille (Burchill *et al.*, 1965) or la concentration en azote dans les feuilles est un facteur important qui détermine la formation de périthèces de *V. inaequalis* (Burchill, 1968). L'activité fongitoxique de l'urée semble directement reliée à la concentration en azote dans la feuille

(Ross, Burchill, 1968). En ce sens l'adjonction à la bouillie d'adjuvants favorisant la pénétration de l'urée est sans doute une voie à explorer pour optimiser les résultats.

L'urée semble avoir un effet sur le développement mycélien, mais beaucoup moins net que sur les périthèces (Ross et Burchill, 1968 ; MacHardy, 1996).

L'efficacité particulièrement intéressante qui a été observée sur les projections d'ascospores suite à des applications de printemps (sur la litière) montre qu'il y a bien une toxicité de l'urée sur les ascospores (Ross et Burchill, 1968 ; MacHardy, 1996) mais ce point ne semble pas avoir été très travaillé par les auteurs.

Effet notable, mais probablement secondaire sous nos climats, Cook en 1969 a étudié les effets de l'urée sur les conidies conservées dans les taches sur pousse. Cet auteur a montré que la réduction du nombre de conidies viables au printemps suivant était de 94% sur bois mort et de 64 % sur bois vivant avec les pulvérisations d'urée à l'automne.

2. Augmentation du pH dans les feuilles

L'acidité des solutions utilisées en vue de limiter la formation des périthèces semble déterminante. Dans certains cas, elle influe même probablement plus sur le résultat que la substance utilisée (MacHardy, 1996). Cook a montré qu'en conditions neutre ou alcalines (pH > 6,5), la formation des périthèces était fortement réduite (Cook, 1969). Or l'urée provoque une élévation du pH dans la feuille, liée à sa décomposition par la flore microbienne (Crosse *et al.*, 1968). Cette constatation a amené certains auteurs à tester différentes substances pouvant augmenter le pH de la feuille. La plus efficace est sans doute une solution tamponnée (pH > 7) à base de phosphate (Cook, 1969).

3. Antagonisme de la flore microbienne

Suite aux applications d'urée les feuilles traitées prennent une couleur brune plus foncée que les feuilles témoins. Cette modification de la couleur est liée aux changements d'activité microbienne (Burchill *et al.*, 1965 ; Crosse *et al.*, 1968). Dans un premier temps la flore bactérienne est fortement stimulée par l'apport d'azote. Cette augmentation de la population s'accompagne d'une sélection des populations au profit de bactéries Gram négatif et notamment *Pseudomonas fluorescens* (Crosse *et al.*, 1968 ; Cook, 1969 ; Meszka et Bielenin, 2001). Mais *Pseudomonas fluorescens* n'est pas la seule bactérie à avoir un effet antagoniste sur *V. inaequalis*. Crosse et al. citent, sans la nommer, une bactérie péritriche Gram négative rouge dont le filtrat de culture provoque des changements marqués sur les tubes germinatifs des conidies de *V. inaequalis* (Crosse *et al.*, 1968). Il a déjà été vu plus haut que dans un contexte de forte compétition alimentaire, beaucoup d'organismes de la phyllosphère peuvent également prendre le dessus sur *V. inaequalis*. L'intérêt de l'urée est d'amplifier les compétitions assez tôt pour empêcher ou gêner la formation de périthèces de *V. inaequalis* (MacHardy, 1996). De fait, deux mois après l'application d'urée, les populations microbiennes des feuilles traitées et témoins ne sont plus différentes (Crosse *et al.*, 1968).

4. Activité de dégradation de la flore microbienne (pectinases)

De nombreuses observations ont été faites sur l'effet de l'urée sur la dégradation du feuillage (Burchill *et al.*, 1965 ; Creemers *et al.*, 2002 ; Cook, 1969). La sélection de flore en faveur d'organismes à forte production d'enzymes pectinolytiques, comme *Pseudomonas fluorescens*, est probablement à l'origine de l'état des feuilles traitées (Crosse *et al.*, 1968). La stimulation de l'activité microbienne qui suit les applications d'urée provoque une baisse du rapport C/N qui entraîne une accélération de la décomposition des feuilles (Burchill, 1968 ; Thakur et Sharma, 1998).

5. Stimulation de l'appétence des feuilles pour les vers de terre

Plusieurs auteurs (Crosse *et al.*, 1968 ; Burchill, 1968 ; Cook, 1969 ; Burchill et Cook, 1971 ; Heye et Andrews, 1983) ont observé que l'urée pouvait avoir un effet favorisant sur les vers de terre. Mais des travaux récents (Heijne *et al.*, 2005) tendraient à montrer que les pulvérisations d'urée à 5 % n'ont pas d'effet sur l'appétence des feuilles pour les vers de terre (le trempage des feuilles ayant, par contre, un effet répulsif). Ce résultat n'est pas forcément contradictoire avec les précédents si l'on considère que l'urée agit indirectement (donc avec un délai) sur la microflore dont les effets peuvent, par contre, favoriser l'appétence. En effet les observations de Bart Heinje ont été faites peu de temps (quelques heures) après le traitement.

1.5.3. Périodes d'apport à l'automne et au printemps

Plus le temps entre la pulvérisation et la chute des feuilles est court, plus les effets de l'azote sont marqués (Burchill, 1968). Les applications trop précoces d'urée avant la chute des feuilles laissent la possibilité d'une remobilisation partielle de l'azote sous forme d'acides aminés dans les parties pérennes qui rend le traitement moins efficace sur la formation de périthèces (Burchill, 1968). Le stade d'application recherché pour les applications d'urée est assez fugace, au début de constitution de la zone d'abscission au niveau du pédoncule mais avant la perte totale de capacité d'absorption des feuilles (Heller *et al.*, 2000). Le processus de défoliation n'étant pas synchrone pour toutes les feuilles, le meilleur stade d'application de l'urée est donc forcément un compromis. Plusieurs travaux ont porté sur la détermination du stade d'application optimal (Burchill, 1968 ; Gupta, 1979). Un tiers de la chute des feuilles est souvent cité comme étant le meilleur compromis (Biggs et Warner, 1990 ; Biggs, 2004).

Les applications d'urée au printemps, au sol, avant le débourrement ont fait preuve d'une grande efficacité (Burchill, 1968 ; Miller, 1970, cité par MacHardy, 1996 ; Gupta et Lele, 1980 ; Creemers, Vanmechelen et Herbots, 1996). L'application se fait à la rampe à désherber, à 5% d'urée pour 200 l de bouillie par hectare, soit 4,6 U d'azote /ha (Crété, 2005). Le stade d'application correspond à l'époque de débourrement du verger (Gupta et Lele, 1980).

Néanmoins dans les quelques travaux sur le sujet, si l'efficacité des apports de printemps est plus ou moins équivalente à ceux d'automne, il n'a pas été montré de synergie particulière quand les deux apports étaient réalisés. Mais peu de travaux ont porté sur ce point (MacHardy, 1996).

1.5.4. Concentration d'urée et associations

La détermination de la concentration d'urée optimale a été étudiée par plusieurs auteurs, (Burchill *et al.*, 1965. Gupta et Lele, 1980. Creemers *et al.*, 1996 ; Wood et Beresford, 2000) dans la plupart des cas, 5% d'urée s'est avérée être la concentration la plus efficace. Par le passé, en France, une certaine confusion sur la dose a pu régner. En effet les 5% ont parfois été calculés sur la dose d'azote, soit 120 kg d'urée à 46% pour 1000 litres de bouillie (Bassino et Blanc, 1975 ; Olivier, 1986). Or il s'agit bien de 5% d'urée soit 50 kg d'urée pour 1000 litres de bouillie qui a été testé par les auteurs. Une dose de 120 kg s'avérait, de plus, difficile à dissoudre dans le pulvérisateur et d'une grande agressivité pour le matériel. Au-delà de 5% (23 U N/ha), des mortalités de bourgeons au printemps suivant ont d'ailleurs été signalées (Wood et Beresford, 2000).

L'utilisation de différents adjuvants a parfois été testée, soit pour favoriser la pulvérisation, l'Agral® par exemple (Burchill *et al.*, 1965), ou de substances destinées à favoriser la chute des feuilles, le sulfate de zinc (Moller, 1981) ou l'éthéphon (Heye, 1982, cité par MacHardy, 1996). Si les effets du sulfate de zinc ne sont pas clairement donnés par la publication, l'association d'éthéphon avec l'urée s'est montrée extrêmement efficace, tant sur le groupage de la chute des feuilles que sur les projections d'ascospores. Malheureusement la mortalité de bourgeons sur la modalité traitée à l'éthéphon était jusqu'à sept fois supérieure au témoin. Le chélate de cuivre a donné de bons résultats pour grouper la chute des feuilles (Comptes rendus d'essais, La Morinière, 2005) mais on sait que l'utilisation de cuivre à cette époque peut avoir un effet favorisant de la tavelure (Olivier, 1986). Une étude de Curry,

Ju et Duan (2005) démontre l'intérêt de pulvérisations d'émulsion d'huile végétale (VOE) pour accélérer la chute des feuilles. Néanmoins, la piste des adjuvants susceptibles de grouper la défoliation demeure à explorer (MacHardy, 1996), notamment en secteurs méditerranéens pour lesquels la douceur automnale peut entraîner des défoliations très tardives.

1.5.5. Effets secondaires et interrogations concernant l'utilisation de l'urée

1. Aspect environnemental

Un des freins majeur à l'utilisation de l'urée à l'automne est le risque environnemental qui pourrait en découler. Beaucoup de travaux portent sur la lixiviation des nitrates, mais nous n'avons pas trouvé d'étude spécifique sur les conséquences environnementales d'un apport sous forme uréique à des arbres fruitiers, par voie foliaire.

La fraction d'azote qui n'atteint pas le feuillage et arrive directement au sol devrait être mesurée plus précisément mais elle est estimée à 30-40 % selon le volume de la végétation (Aubertot *et al.*, 2005). Si on admet que la partie qui atteint le feuillage est, soit absorbée par les feuilles, soit consommée par les micro-organismes, c'est environ 10 kg/ha d'azote (40% de 50 kg d'urée à 46% d'azote) qui arrivent au sol, et sont susceptibles d'être lixiviés dans les mois qui suivent l'application. Mais durant la période de chute des feuilles, la température de sol à -10 cm varie en moyenne entre 4 et 12 °C dans les conditions du sud de la France (cf. annexe 16). A ces températures, les processus de nitrification sont très réduits et la forme uréique est peu lixiviable en l'état. Ceci laisse donc d'autant plus de temps aux micro-organismes et/ou au couvert végétal pour immobiliser l'azote sous forme organique. En 2005, au CEHM, des séries de mesures (prélèvement à la tarière, horizon 0-30, extraction à l'eau et dosage au Nitrachek®) n'ont pas permis de mettre en évidence une différence de concentration en nitrate entre des parcelles traitées et non traitées (Crété, non publié). De fait, l'écart type habituel pour ce genre de mesures étant de l'ordre de 25 unités d'azote (Wery, comm. Pers.), le nombre de répétitions qui auraient été nécessaires pour mettre en évidence une différence était bien au-delà de nos possibilités matérielles.

Compte tenu de la difficulté de mesurer l'impact écologique d'une telle quantité d'azote, on ne peut qu'estimer que le risque est relativement faible en regard d'une éventuelle réduction du nombre de fongicides appliqués au printemps suivant.

2. Sensibilisation aux risques de gelées de printemps

Plusieurs auteurs ont évoqué les risques liés à une utilisation de l'urée à l'automne, mort de bourgeons (Wood et Beresford, 2000), sensibilisation au froid (Tartachinik, 1997 ; Khemira *et al.*, 2000 ; Meszka *et al.*, 2003). Dans la majeure partie des cas, les problèmes évoqués résultent d'applications à trop forte fréquence, à trop forte concentration ou trop précoces (Wood, Beresford, 2000 ; Khemira *et al.*, 2000). Dans d'autres cas, les applications étaient réalisées dans des conditions climatiques extrêmes (Tartachinik, 1997 ; Meszka *et al.*, 2003). En 2002 un travail canadien a mesuré la sensibilité au gel de bourgeons ayant subi un trempage dans l'urée (méthode de Khanizadeh, 2002). Les mesures n'ont pas montré de différences significatives de sensibilité au gel avec le témoin (Carisse *et al.* 2002). Aucune référence n'a pu être trouvée, qui montrerait, comme c'est souvent avancé, que l'urée appliquée à 5% à la chute des feuilles, sous nos climats, aurait un effet sur la sensibilisation au gel, ni même sur la phénologie.

Malgré tout, compte tenu du risque économique important que constitue une gelée de printemps, ce point mérite sans doute quelques vérifications.

3. Sensibilisation aux chancres

Une des critiques souvent faite contre l'utilisation de l'urée foliaire est la sensibilisation des arbres aux chancres.

Bien que cette critique soit récurrente et constitue un frein important à l'utilisation de l'urée, aucune référence scientifique n'a pu être trouvée sur ce point. Nous avons interrogé, sur ce sujet, plusieurs spécialistes européens et nord américains. Aucun n'a pu confirmer cet effet supposé, ni même en donner l'origine. La seule information sur ce sujet provient du Maine-et-Loire où un fort développement de chancres a souvent été observé dans les vergers à proximité des poulaillers industriels (Huberdeau, comm. pers.). L'explication du phénomène serait la concentration d'ammoniac gazeux qui pourrait favoriser les chancres européens (*Nectria galligena*). A notre connaissance, cette explication n'a jamais été vérifiée.

Quoi qu'il en soit, le lien avec l'urée semble ténu puisque, si cette substance se décompose bien en ammoniac, à la dose utilisée, les quantités sont faibles dans le sol et probablement infimes dans l'air.

En 2002, Dominique Biche (Chambre d'Agriculture des Côtes d'Armor) a mis en place un essai multi-site sur quatre cultivars de pommiers à cidre dont Judor® et Judella® connus pour leur sensibilité au chancre. Un apport total de 80 kg d'urée, en quatre fois n'a pas entraîné d'accroissement des attaques de chancre (Biche, comm. pers.).

Le sud-est de la France bénéficiant d'un climat peu favorable aux chancres, aucun travail de vérification de cette allégation ne pourra y être mis en œuvre.

1.5.6. Les associations de techniques

Peu de travaux anciens ont porté sur l'efficacité d'associations de techniques prophylactiques (MacHardy, 1996). Ces dernières années quelques études ont exploré ces possibilités en vergers commerciaux (Creemers, Vanmechelen, Herbots, 1996 ; Sutton, MacHardy, Lord, 2000), les résultats montrent une réduction du nombre de fruits touchés et de la sévérité des symptômes pour un broyage précédé d'une pulvérisation d'urée comparé à un broyage effectué seul. Dans tous les cas, les auteurs ont souligné l'intérêt et la complémentarité de ces techniques combinées.

En 2000, une étude italienne a montré que l'efficacité d'*Athelia bombacina* était sensiblement améliorée par l'adjonction d'urée (Fiaccadori, Cesari, 2000).

Plusieurs travaux canadiens ont montré que les associations de techniques suivantes : urée + broyage, urée + *Microsphaeropsis ochracea*, *Microsphaeropsis ochracea* + broyage, présentaient une efficacité significativement meilleure qu'une seule des techniques mise en œuvre (Carisse *et al.*, 2002 ; Vincent *et al.*, 2004). La pulvérisation d'urée sur la litière au moment du broyage a aussi été proposée, mais à notre connaissance jamais essayée (Creemers, 2005). L'association d'urée et de champignons antagonistes a été explorée en Inde à différentes altitudes (Thakur et Sharma, 1999). Ces auteurs ont mis en évidence une synergie entre les deux techniques sur la réduction des productions de périthèces. Curry *et al.* (2005) ont également montré une synergie entre les applications d'urée et d'une émulsion d'huile végétale associée, ou non, au retrait de la litière.

2. Discussion

2.1. De l'urée et l'environnement

D'un point de vue environnemental, l'apport de printemps, au sol, ne pose pas de problème particulier, puisqu'il peut être pris en compte dans la fertilisation azotée, de toute façon réalisée. Par contre, compte tenu des pluies hivernales, on doit être particulièrement vigilant sur le devenir de l'azote apporté à l'automne. En ce sens la mise au point d'une formule à concentration limitée en azote serait

un progrès évident d'un point de vue environnemental, mais également en termes d'acceptabilité de la technique par les différents cahiers des charges auxquels les producteurs peuvent adhérer. Nous avons pu montrer que certaines formulations pouvaient atteindre des niveaux d'efficacité sur les projections d'ascospores équivalents à l'urée utilisée classiquement, mais l'effet sur la dégradation des feuilles était significativement moindre.

Il serait possible de se priver de cette époque d'apport et se limiter aux apports de printemps qui ont également fait preuve d'une bonne efficacité. En effet, le broyage associé dans l'avenir à *Microspaeopsis ochracea* pourrait sans doute permettre d'atteindre un taux de réduction d'inoculum intéressant. Cependant deux éléments sont à prendre en compte, le prix de *Microspaeopsis ochracea*, inconnu à ce jour, mais sans aucun doute plus cher que l'urée, et le fait que l'objectif de réduction de l'utilisation de fongicides ne pourra être atteint que si on fait chuter de manière extrêmement importante l'inoculum. Dans ce contexte le choix de se priver d'un outil qui a fait la preuve de son efficacité et de sa complémentarité avec les autres techniques, n'est pas forcément en faveur de l'environnement.

D'un point de vue environnemental, la pratique du désherbage chimique est sans doute beaucoup plus discutable. Pourtant nous avons vu, dans l'étude bibliographique, que certains herbicides pouvaient avoir un effet sur les projections d'ascospores. Néanmoins, malgré cet effet positif marginal, nous avons également vu que le mode d'entretien de la bande de plantation pouvait avoir un effet sur la vitesse de dégradation de la litière. Le désherbage total de la bande de plantation, peu favorable à la vie microbienne, présente de nombreux inconvénients. Le principal est sans doute environnemental : la pauvreté de la vie microbienne entraîne une difficulté plus importante à dégrader les molécules chimiques qui peuvent ainsi être entraînées dans les couches profondes jusqu'aux nappes phréatiques. Vis à vis de la tavelure, le maintien de la litière plus tardivement, a pour conséquence de prolonger d'autant la durée des contaminations primaires et donc la période de protection chimique.

Mis à part les jeunes plantations pour lesquelles la concurrence avec l'enherbement est importante, le désherbage total de la bande de plantation pourrait facilement être évité en production de pomme si ce n'était le problème des campagnols (*Pitymys duodecimcostatus*). Ce rongeur colonise les vergers de façon importante, notamment dans les zones enherbées. L'écorce de la base de l'arbre est particulièrement appréciée de ce ravageur, notamment pour le porte greffe le plus couramment utilisé (M9). De ce point de vue, le travail du sol, au moins à certaines époques de l'année, pourrait être une solution à envisager. Ce critère particulier pourrait aussi entrer dans les éléments de sélection des portes greffes.

A court terme un désherbage d'une zone plus étroite sur la bande de plantation pourrait être un compromis temporairement acceptable.

2.2. De l'intérêt de la prophylaxie en situation de faible inoculum

A première vue, on pourrait s'interroger sur l'intérêt de la prophylaxie en secteur méditerranéen, a priori, peu favorable à la tavelure, et d'une manière générale sur l'intérêt de la prophylaxie en situation de faible inoculum.

L'inoculum en secteur méditerranéen n'est pas toujours faible, il semble plutôt « cyclique » selon la succession des printemps et automnes plus ou moins secs. Contrairement à la région sud-ouest ou le Val de Loire où son importance est probablement plus stable, l'inoculum dans la région sud-est peut varier entre un niveau très faible et très fort selon le climat des saisons précédentes.

A ce jour, la faible proportion d'exploitations qui mettent œuvre la prophylaxie n'utilisent qu'une technique une fois par an, en général sur les cultivars sensibles (Gala) et les parcelles les plus touchées. Or il est probable que dans ce contexte, la prophylaxie est largement insuffisante pour avoir un impact économique tangible (MacHardy, 2000). Si la prophylaxie n'est sans doute pas inutile dans ce genre de situation, c'est bien plus pour des cultivars moyennement à peu sensibles à la tavelure et des inoculum moyens à faibles que le bénéfice direct peut être le plus grand pour les arboriculteurs (allègement de la lutte chimique).

Le seuil de PAD défini par MacHardy comme pouvant permettre d'envisager une lutte chimique réduite est de 600 (MacHardy, 1996). Si on admet ce seuil, alors que les valeurs de PAD peuvent atteindre 30 millions d'ascospores par m² de verger, c'est d'un facteur 50 000 qu'il convient de réduire l'inoculum. On voit bien que dans ces conditions de fort inoculum, aucune des pratiques de prophylaxie connues ne permet d'atteindre un tel niveau de réduction, d'où le scepticisme de MacHardy sur l'intérêt de la prophylaxie dans ce cas. Pour un PAD de 1 million, qui semble assez courant en secteur méditerranéen (au moins pour le cultivar Gala), le facteur de réduction nécessaire est tout de même de presque 1700. Dans cette situation, que l'on peut qualifier d'inoculum moyen, il n'est malgré tout pas raisonnable de penser qu'une seule technique prophylactique puisse permettre de réduire la lutte chimique. Les nombreux essais qui ont été publiés sur le sujet, permettent d'avoir une idée approximative de l'efficacité potentielle des différentes techniques prophylactiques : broyage d'automne, 60 %, urée d'automne, 70 %, *Microspaeopsis ochracea*, 70 %, urée de printemps, 70 %, MacHardy cite aussi le broyage de printemps (avec le bois de taille) avec une efficacité de l'ordre de 75 % (MacHardy, 1996). Le cumul de toutes ces efficacités permettrait de réduire l'inoculum d'un facteur 370. Mais il est possible qu'une simple addition soit un mode de calcul très inexact, et rien ne dit qu'il soit optimiste ou pessimiste. En effet, des synergies sont possibles entre le broyage d'automne et l'urée d'automne, entre l'urée et *Mo.*, entre urée de printemps et broyage de printemps...mais les références techniques manquent.

En mettant en œuvre une stratégie prophylactique maximale, la lutte chimique peut probablement être allégée jusqu'à des valeurs de PAD de l'ordre de 200000 (600 x 370). La mise en œuvre d'association des différentes techniques prophylactiques pouvant être gérée selon l'importance de l'inoculum initial. Reste le problème de l'appréciation de l'inoculum, en effet, si les comptages d'automne apportent une assez bonne indication, ils ne tiennent pas compte de l'effet des conditions climatiques hivernales sur l'évolution de cet inoculum. Ainsi le comptage d'automne n'indique qu'un potentiel d'inoculum, le réel ne pouvant être obtenu qu'en sortie d'hiver. Or, à ce jour, aucune méthode ne permet de quantifier correctement l'inoculum à cette période. En secteur méditerranéen, les hivers peuvent être très secs (2004/2005 et 2006/2007 par exemple). La prise en compte de ces conditions permettrait, sans doute, d'aller plus loin dans les prises de risque durant la période de lutte chimique. Sur l'essai 5, par exemple, nous avons vu que le témoin non traité n'a développé aucun symptôme en 2007. Il serait important de comprendre pourquoi, et dans quelles conditions ce cas de figure peut se reproduire.

2.3. De la sensibilité variétale

Ces dernières années, en secteur méditerranéen, moins de 2 contaminations par an, en moyenne, sont à l'origine d'apparitions significatives de taches (1,4 en moyenne entre 1991 et 2006, réseau phytosanitaire PACA et 1 en Languedoc entre 2000 et 2006). Pour les autres épisodes pluvieux, l'apparition de symptômes dépend de l'inoculum, de la sensibilité variétale et de la vigueur du verger. Dans ces conditions, une couverture chimique durant les deux mois que dure la période de contamination primaire semble disproportionnée (11 traitements par an en moyenne dans le sud-est, cf. annexe 17).

Ceci s'explique sans doute par l'incertitude des prévisions météorologiques pour permettre une intervention chimique ciblée, et probablement aussi par l'absence de prise de risque des producteurs et leur service technique. Il est vrai que pour les producteurs, dont les exploitations sont fragilisées par un contexte économique difficile, un risque mal calculé peut remettre en question l'avenir même de l'entreprise. Les techniciens, quant à eux, sont de plus en plus exposés à la dérive procédurière que l'on observe depuis plusieurs années dans le milieu agricole. Dans ce contexte, on comprend aisément que la prise de risque soit exclue. Cette évolution des métiers de conseiller technique et de producteur est sans doute un obstacle important à l'évolution des pratiques phytosanitaires, pourtant, il existe sans doute une voie possible entre une sécurisation excessive et une prise de risque incontrôlée.

En verger non traité, Parisi *et al.* (2004) ont montré que la courbe épidémiologique de la tavelure pouvait être très différente selon la sensibilité variétale. En Languedoc, parmi les cultivars importants figurent Granny Smith et Reine des Reinettes (cf. annexe 18), de façon plus marginale, Chantecler et Redwinter. Tous ces cultivars sont assez peu sensibles à la tavelure, or, en général, les stratégies de lutte chimique n'y sont pas différentes de celles, par exemple, mises en œuvre pour Gala, Pink Lady® ou Sundowner®.

Une grande partie de l'intérêt de la prophylaxie est de limiter les conséquences économiques d'un éventuel échec de protection phytosanitaire et donc de rendre plus acceptable la prise de risque. Dans l'avenir, les améliorations de la modélisation de la maladie et des prévisions météorologiques pourraient permettre d'envisager une lutte plus ciblée, sur les événements majeurs et en prenant plus en compte la sensibilité variétale et l'inoculum. Dans certaines situations, on peut envisager de laisser des épisodes de moindre importance, notamment pour des cultivars moins sensibles, sans protection chimique. Une telle évolution induira probablement plus d'interventions en « stop », or ces interventions sont potentiellement plus risquées, tant du point de vue de l'efficacité que de l'exposition au risque de résistance du champignon aux molécules chimiques. Dans ces conditions, la réduction de l'inoculum est d'autant plus importante pour garantir une durabilité acceptable de la technique.

La proposition de grille de décision d'Olivier (1986), reprise par Lefeuvre (1995), puis par Parisi *et al.* (2004) prenait en compte la sensibilité variétale, l'importance de l'inoculum d'automne et la densité de la projection d'ascospores (cf. annexe 19). En fonction de ces différents paramètres elle proposait un seuil de déclenchement des traitements selon la gravité du risque climatique (Mills). Lors d'une communication orale (Rencontres Ctifl-Srpv 2005), Marc Trapman, le concepteur de RIMpro, proposait la valeur du RIM comme seuil de décision de traitement (cf. annexe 19). Lors de la réunion du groupe de travail national à l'automne 2006, nous avons proposé la discussion d'une autre grille de décision (figure 31), inspirée des précédentes pour définir les grandes lignes d'une stratégie de lutte et l'intérêt de la prophylaxie pour les différents cas.

		Inoculum fort	Inoculum moyen	Inoculum faible
Cultivars très sensibles	Prophylaxie	Utile à long terme Effets réels mais trop insuffisants	Grand intérêt	Grand intérêt
	Lutte chimique	Lutte renforcée, traitements préventif + curatif sur pics de projection	Lutte normale	Lutte adaptée (Raisonnement selon RIM, vigueur?)
Cultivars moyennement sensibles	Prophylaxie	Grand intérêt	Grand intérêt	Grand intérêt
	Lutte chimique	Lutte normale	Lutte adaptée (Raisonnement selon RIM, vigueur?)	Lutte réduite, Fin de protection anticipée
Cultivars peu sensibles	Prophylaxie	Grand intérêt	Grand intérêt	Intérêt limité Probablement pas justifié.
	Lutte chimique	Lutte adaptée (Raisonnement selon RIM, vigueur?)	Lutte réduite, Fin de protection anticipée	Lutte réduite, Traitement curatif des pics de projection

Figure 4 : Grille d'aide au choix d'une stratégie de lutte contre la tavelure

2.4. Du choix de l'indice RIM plutôt que le risque Mills comme seuil de décision

Le RIM intègre plusieurs éléments de raisonnement comme ; le risque climatique (Mills), le risque biologique (volume de la projection), le stade phénologique de la plante, la vitesse de croissance des pousses (somme de températures). Cet indice intégrateur est extrêmement facile à utiliser pour un non expert. Le danger étant une perte de la vue d'ensemble des divers éléments du raisonnement. C'est pourquoi beaucoup d'experts préfèrent continuer à « garder la main » sur tous les leviers du raisonnement.

Pour un agent de développement, le RIM présente l'immense intérêt de la simplicité. Mais encore faut-il que les seuils de décision soient définis pour les différentes situations d'inoculum et de sensibilité variétale. Un gros travail reste donc à faire.

2.5. Du coût de la prophylaxie

Avec les principales techniques utilisables à ce jour, le coût d'un programme prophylactique complet représente environ 100 €/ha (tableau 33). Le coût d'un traitement fongicide peut varier entre 30 et 50 €/ha (produit + tracteur + pulvérisateur + main d'œuvre). En situation d'inoculum faible, nous avons vu qu'il était sans doute possible d'économiser au moins deux traitements en fin de contamination primaire du fait, notamment, de l'accélération de décomposition de la litière. Soit le coût de la prophylaxie. En situation d'inoculum moyen ou fort, la prophylaxie peut permettre d'éviter les traitements durant la période de contamination secondaire, le gain est alors nettement supérieur, environs 6 traitements en moyenne selon une enquête réalisée par le CEHM sur la région Languedoc entre 2002 et 2006 (non publié).

Tableau 2 : Eléments de coût de la prophylaxie

Programme de prophylaxie	Temps de réalisation en h/ha	Coût en euros par hectare (*)							
		Main (**) d'œuvre	Tracteur	Broyeur	Andaineur	Pulvé arbo	Cuve de desherbage	Urée	Total
Andainage + Broyage	2,0	16,54	6,14	17,47	5,06				45,21
Pulvérisation d'urée à l'automne	0,7	5,79	6,14			7,3		19,00	38,23
Pulvérisation d'urée au printemps	1,0	8,27	6,14				6,73	3,80	24,94
Programme de prophylaxie complet	3,7	30,6	18,42	17,47	5,06	7,3	6,73	22,8	108,38

(*) D'après la base de donnée du BCMA

(**) SMIC au 30 juin 2006 (8,27 €/h)

Le prix de *Microspaesopsis o.* n'est pas connu à ce jour, on ne connaît pas non plus les possibilités de réduction de la lutte qu'il permettra d'envisager.

Dans cette analyse on doit aussi prendre en compte le risque économique en cas d'échec de protection. Dans cette situation, les coûts peuvent être extrêmement lourds ; sur-protection chimique (environ 260 €/ha, enquête CEHM), temps d'éclaircissage manuel supplémentaire pour retirer les fruits tachés, temps de récolte pénalisé par le tri nécessaire, pertes directes de production, obligation de stratégies chimiques plus « lourdes » l'année suivante...

On peut aussi évoquer les risques liés à la perte d'une famille chimique avec l'apparition de résistance.

Tous ces aspects ont un impact économique plus ou moins lourd sur les exploitations agricoles même si leur quantification n'est pas toujours aisée.

2.6. Des perspectives d'évolution de la lutte contre la tavelure

La notion de seuil de tolérance, généralement acceptée (sinon toujours utilisée) par les producteurs, est complètement absente du raisonnement de la lutte contre la tavelure du pommier. Mais il est vrai qu'un niveau de dégât faible en début de contamination primaire peut avoir des conséquences économiques extrêmement graves à la récolte. Intégrer la notion de seuil de tolérance, implique donc d'accepter quelques dégâts en fin de contamination primaire **et** de mettre en œuvre une stratégie prophylactique rigoureuse pour faire baisser l'inoculum entre deux saisons.

Un certain nombre de points laissent penser qu'un allègement de la lutte chimique à cette période est possible :

- le végétal est moins sensible à la fin des contaminations primaires,
- le nombre d'ascospores projetable est en baisse,
- les pluies sont plus rares (cf.annexe 20)
- les pulvérisations d'urée et le broyage permettent d'accélérer la décomposition de la litière.

Les essais réalisés par le Cirea et Perlim en Limousin (Lompré et Lassoueuil, comm. pers.) ont montré que le broyage seul permettait d'avancer sensiblement la date d'arrêt de la lutte chimique sans conséquence grave (Cultivar Golden Delicious).

2.7. Des relations avec le réchauffement climatique

Même si un débat demeure encore sur son intensité, le réchauffement climatique est un fait largement accepté par la communauté scientifique. Le climat méditerranéen sera donc très probablement largement perturbé par cette évolution. On peut s'attendre, dans les décennies à venir, à des étés et des automnes plus chauds et, une pluviométrie sans doute réduite. Dans ce contexte une maladie cryptogamique comme la tavelure, déjà peu favorisée en conditions méditerranéennes actuelles, pourrait basculer dans la catégorie des maladies mineures sous nos climats futurs. Dans un tel contexte, la lutte contre cette maladie pourrait prendre des formes assez différentes des standards actuels. On peut même envisager que la prophylaxie puisse devenir une stratégie de lutte suffisante.

Références citées

- Agrios, G.N., 1988.** Plant Pathology, 3rd ed., Academic Press, San Diego (CA, USA). 803p.
- Anonyme, 2003.** Note nationale tavelure. INRA. DGAL-SDQPV.
- Anonyme, 2005.** Biosecurity Australia. Revised draft import risk analysis report for apples from New Zealand, Part C. , Appendix 3, Biosecurity Australia, Canberra, Australia.
- Aubertot, J.N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., Voltz, M. (éditeurs) 2005.** Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Rapport d'expertise scientifique collective, INRA et Cemagref (France). http://www.inra.fr/_l_institut/missions_et_strategie/les_missions_de_l_inra/eclairer_les_decisions/pesticides_rapport_d_expertise
- Aylor, D.E. 1998.** The aerobiology of apple scab. Plant Disease, 82: 838-849.
- Aylor, D.E., Anagnostakis, S.L. 1991.** Active discharge distance of *Venturia inaequalis*. Phytopathology, 81 : 548-551.
- Aylor, D.E., Sutton, T.B. 1992.** Release of *Venturia inaequalis* ascospores during unsteady rain : Relationship to spore transport and deposition. Phytopathology, 82 : 532-540.
- Bassino, J.P., Blanc, M. 1975.** La tavelure du pommier: Amélioration de la lutte par la destruction de la forme hivernante du champignon. Défense des Végétaux, 174: 149-153.
- Becker, C.M. 1990.** Overwintering of anamorph of *Venturia inaequalis* (*Spilocaea pomi*) in apple buds and viability of conidia as affected by discontinuous wetting. Ph.D. dissertation. Cornell University, Ithaca, NY. 86 pp.
- Becker, C.M., Burr, T.J., Smith, C.A. 1992.** Overwintering of *conidia* of *Venturia inaequalis* in apple buds in New York orchards. Plant Disease 76 : 121-126.
- Bengtsson, M., Jørgensen, H. J. L., Wulff, E., Hockenhull, J. 2006.** Prospecting for organic fungicides and resistance inducers to control scab (*Venturia inaequalis*) in organic apple production. In Organic Congress - May 30-31 2006 – Odense – Denmark.
- Bézuat, M., Bernaux, P. 1966.** L'évolution de la tavelure du pommier dans le Bas-Languedoc. Phytoma, 183: 39-41
- Bézuat, M., Bernaux, P. 1970.** L'évolution de la tavelure du pommier dans le Bas-Languedoc de 1964 à 1969. Acad. Agric. Fr. Extrait du procès verbal de la séance du 4 mars 1970, 269-276.
- Bidabé, B. 1967.** Action de la température sur l'évolution des bourgeons de pommier et comparaison de méthodes de contrôle de l'époque de floraison. Ann. Physiol. Vég., 9: 65-86.
- Biggs, A.R., Warner, J., 1990.** Full-season and post-harvest application of sterol-inhibiting fungicides to reduce ascospore formation in *Venturia inaequalis*. Phytoprotection, 77: 129-134.
- Biggs, A.R., 2004.** Fruit pest news. Plant Pathologist., 5 (22). <http://web.utk.edu/~extepp/fpn/fpn092104.htm>
- Bovey, R., Baggiolini, M., Bolay, E., Corbaz, R., Mathys, G., Meylan, A., Murbach, R., Pelet, F., Savary A., Trivelli, G. 1967.** La défense des plantes cultivées. Traité pratique de phytopathologie et de zoologie agricole, Payot (Lausanne), 5^{ème} édition. P.242-247.
- Brown, M.W., Tworcoski, T. 2004.** Pest management benefits of compost mulch in apple orchards. Agriculture, Ecosystems and Environment, 103: 465-472
- Burchill, R.T. 1968.** Etudes au laboratoire et au champ de l'effet de l'urée sur la production d'ascospores de *Venturia inaequalis*. Ann. Appl. Biol., 62: 297-307.
- Burchill, R.T., Hutton, K.E., Crosse J.E., Garrett, C.E.M. 1965.** Inhibition of the perfect stage of *Venturia inaequalis* by urea. Nature, 205: 520-521.

Commentaire [JLR1]: webographie à établir à part ... si tu as consulté en ligne. Sinon, compléter la réf avec le nb de pages, et INRA Ed. (Paris)

Commentaire [JLR2]: pas moyen de retrouver cette réf avec mes outils habituels.

- Burchill, R.T., Cook, R.T.A. 1971.** The interaction of urea and micro-organisms in suppressing the development of perithecia of *Venturia inaequalis* (Cke.) Wint. In: Ecology of leaf surfaces micro-organisms. T.F. Preece and C.H. Dickinson, eds. Academic press, London. p.471-483.
- Burchill, R.T., Swait, A.A.J. 1977.** Eradication of the perithecial stage of apple scab with surfactants. *Ann. Appl. Biol.*, 87: 229-231.
- Carisse, O., Bernier, J. 2002.** *Microspaeopsis ochracea* sp. (Nov.) associated with dead apple leaves. *Mycologia*, 94: 297-301.
- Carisse, O., Dewdney, M. 2002.** A review of non-fungicidal approaches for the control of apple scab. *Phytoprotection*, 83 : 1-29.
- Carisse, O., Phillon, V., Rolland, D., Bernier, J. 2000.** Effects of application of fungal antagonist on spring ascospore production of the apple scab pathogen, *Venturia inaequalis*. *Phytopathology*, 90: 31-37.
- Carisse, O., Marmen, J., Morin, Y., Phillon, V., Rolland, D. 2002.** Mise au point technique de l'urée et d'un agent de lutte biologique en vergers commerciaux pour réduire la quantité de fongicide utilisée contre la tavelure du pommier. Rapport final du Programme agroenvironnemental de soutien à la Stratégie phytosanitaire du Plan d'action Saint Laurent Vision 2000. AGRI-1-POM-98-021.
- Caruso, F.L., Cody, R.H. 1984.** Potential for induced resistance in apple against infection by *V. inaequalis*. *Can. J. Plant. Pathol.*, 6: 151-159.
- Cesari, A. 2001.** Lutte alternative contre la tavelure par l'emploi du champignon antagoniste *Athelia bombacina*. CTIFL-colloque européen pomme "protection biologique et alternative pomme: verger-conservation". 16-18 mai 2001. Bordeaux
- Ciecierski, W., Cimanowski, J., Bielenin, A., 1995.** Effect of urea application on ascospore production of *Venturia inaequalis*. Proceedings of the international conference on integrated fruit production, Poland: Research Institute of Pomology and Floriculture, 28 aout-02 septembre 1995: 395-396.
- Cimanowski, J., Bielenin, A., Ciecierski W. 1997.** Effect of autumn urea application on a ascospore production of *Venturia inaequalis* and on control of apple scab. *OILB/SROP Bull.*, 20: 64-68.
- Cook, R.T.A. 1969.** Studies on the overwintering of *Venturia inaequalis* (Cke.) Wint. Ph.D. dissertation. University of London. 205 pp.
- Cook, R.T.A., Swait, A.A.J., Burchill, R.T. 1973.** The effect of fungicides on earthworms and leaf decomposition. Rep. E. Malling Res. Stn. for 1972, p. 140.
- Creemers, P. 1990.** Lutter contre les maladies cryptogamiques en protection intégrée sur pommiers et poiriers. *Le Fruit Belge*, 430: 123-128.
- Creemers, P. 2005.** Les avertissements tavelure dans l'avenir: du curatif vers le préventif. *Le Fruit Belge*, 517: 162-163.
- Creemers, P., Vanmechelen, A., Herbots, A. 1996.** Lutte contre la tavelure du pommier par un schéma réduit de traitements intégrant les caractéristiques des fongicides et du climat ainsi que des paramètres biologiques. *Le Fruit Belge* 459: 7-11.
- Creemers, P. Vanmechelen, A. Hauke, K. 2002.** Sanitation practices to reduce apple scab inoculum in orchards. 6th International IOBC/WPRS Workshop of Pome Fruit Disease, Lindau, Germany, 2002.
- Crété, X., 2005.** Tavelure du pommier : Revenir à la prophylaxie. Document de vulgarisation. CEHM. éd., pp.6.
- Crosse, J.E, Garrett, C.M.E. et Burchill, R.T. 1968.** Changes in the microbial population of apple leaves associated with the inhibition of the perfect stage of *Venturia inaequalis* after urea treatment. *Ann. Appl. Biol.*, 61: 203-216.
- Curry, E., Ju, Z., Duan, Y. 2005.** Apple scab management assisted by postharvest tree defoliation with vegetable oil emulsion. *HortTechnology*, 15(4): 854-858.

- Darpoux, H., Lebrun, A., De la Tullaye, B. 1975.** Action de traitements sur la formation des périthèces et la production de l'inoculum primaire de *Venturia inaequalis*. Phytiairie-phytopharmacie, 24 : 3-14.
- Dionnet, J.M., 1982.** Contribution à l'élaboration d'une lutte raisonnée contre la tavelure du pommier. Mémoire d'ingénieur, ENITA Angers.
- Dupont, N. Biche, D. Cardon, J.C. Corroyer, B. 2006.** Lutte contre la tavelure : comment réduire l'inoculum d'automne ? Cahier technique du Centre Technique de la Pomme à Cidre. n°13, 13-14.
- Fiacadorri, R., Cesari, A. 2000.** Sanitation from *Venturia inaequalis* using an antagonist *Athelia bombacina* to reduce ascospore inoculum. Acta horticulturae, 525: 245-256.
- Fiss, M., Kucheryava, N., Schönherr, J., Kollar, A., Arnold, G., Auling, G. 2000.** Isolation and characterization of epiphytic fungi from the phyllosphere of apple as potential biological agents against apple scab (*Venturia inaequalis*) J. Plant Dis. Protection, 107: 1-11.
- Gadoury, D.M., MacHardy, 1986.** Forecasting ascospore dose of *Venturia inaequalis* in commercial apple orchards. Phytopathology, 76:112-118.
- Gadoury, D.M., Seem, R.C., Stensvand, A. 1993.** Ascospore discharge in *Venturia inaequalis*. Norwegian Journal of Agricultural Sciences, 17: 205-219.
- Gadoury, D.M., Stensvand, A., Seem, R.C.1998.** Influence of light, relative humidity, and maturity of populations on discharge of ascospores of *Venturia inaequalis*. The American Phytopathological Society, 88: 902-909.
- Giraud, M., Orst, R, 2004.** Enquête nationale tavelure 2004. Infos-Ctifl. 218 :31-35.
- Giraud, M., Trapman, M. 2006.** Le modèle RIMpro: Intérêt dans la gestion de la tavelure du pommier. L'Arboriculture Fruitière. 603 : 29-32.
- Gloyer, W.O. 1937.** Evaluation of the Geneva experiment on scab control. (Abstr.) Phytopathology 27 : 129.
- Gomez, C., Brun, L., Chauffour, D., De Le Vallée, D. 2007.** Effect of leaf litter management on scab development in an organic apple orchard. Agriculture, Ecosystems & Environment. 118: 249-255.
- Gupta, G.K. 1979.** Role of on-season, post harvest and pre leaf fall sprays in the control of apple scab (*Venturia inaequalis*). Indian J. Mycol. & Plant pathol. 9: 141-149.
- Gupta, G.K., Lele, V.C. 1980.** Role of urea in suppression of ascigerous stage, and comparative in-vitro efficacy of fungicides against apple scab. Indian J. Agric. Sci. 50 : 167-173.
- Heijne, B., de Jager, A., de Jong, P.F., 2006.** Promotion of leaf degradation by earthworms under laboratory conditions. In Organic congress - May 30-31 2006 – Odense – Denmark.
- Heller, R., Esnault, R., Lance, C., 2000.** Physiologie végétale. Développement. 6^{ème} édition. Dunod (Paris), 384p.
- Heye, C.C. Andrews, J.H. 1983.** Antagonism of *Athelia bombacina* and *Chaetomium globosum* to the apple scab pathogen, *Venturia inaequalis*. Phytopathology 73: 650-654.
- Hirst, J.M., Stedman, O.J. 1962.** The epidemiology of apple scab (*Venturia inaequalis* [Cke] Wint). II. Observation on the liberation of ascospores. Ann. Appl. Biol. 50: 525-550.
- Holb, I.J. 2005.** Effect of pruning on apple scab in organic apple production.. Plant Disease. 89: 611-618.
- Holb, I.J., Heijne, B., Jeger, M.J. 2004.** Overwintering of conidia of *Venturia inaequalis* and the contribution to early epidemics of apple scab. Plant Disease. 88: 751-757.
- Holb, I.J., Heijne, B., Withagen, J.C.M., Jeger, M.J. 2004.** Dispersal of *Venturia inaequalis* ascospores and disease gradients from a defined inoculum source. Journal of Phytopathology,152: 639-646.
- Holb, I.J., Heijne, B., Jeger, M.J. 2005.** The widespread occurrence of overwintered conidial inoculum of *Venturia inaequalis* on shoots and buds in organic and integrated apple orchards across the Netherlands. European Journal of Plant Pathology, 111: 157-168.

- Holb, I.J. 2006.** Effect of six sanitation treatments on leaf density, ascospore production of *Venturia inaequalis* and scab incidence in integrated and organic apple orchards. *European Journal of Plant Pathology*, 115: 293-307.
- Huberdeau, D. 2002.** La tavelure du pommier, trois années difficiles. Journées techniques CTIFL-SPV.
- Jamar, L., Lateur, M. 2005.** Recherche de méthodes alternatives de lutte contre la tavelure du pommier dans le cadre de la production biologique. *Le Fruit Belge*, 515, 70-76.
- James, J.R., Sutton, T.B. 1982.** Environmental factors influencing pseudothecial development and ascospore maturation of *Venturia inaequalis*. *Phytopathology*, 72: 1073-1080.
- Keitt, G.W. 1930.** Fall applications of fungicides in relation to apple-scab control. (Abstr.) *Phytopathology* 20:122.
- Keitt, G.W. 1935.** Progress in the developpement of eradicant fungicides. (Abstr.) *Phytopatology* 25: 23.
- Keitt, G.W., Jones, I.K. 1926.** Studies of the epidemiology and control of apple scab. *Wisc. Agric. Exp. Stn. Bull.* 73. 194 pp.
- Keitt, G.W., Palmiter, V. 1937.** Potentialities of eradicant fungicides for combating apple scab and some other plant diseases. *J.Agric.Res.* 55 : 397.
- Keitt, G.W., Clayton, C.N., Langford, M.H. 1941.** Experiments with eradicant fungicides for combating apple scab. *Phytopathology*, 31: 296-322.
- Khemira, H., Sanchez, E., Righetti, T L., Azarenko, A. N. 2000.** Phytotoxicity of urea and biuret sprays to apple foliage. *Journal of Plant Nutrition*, 23: 35-40.
- Kolbe, W. 1983.** Effects of different pruning systems and chemical retardants compared with no pruning on apple trees on yield fruit quality and disease incidence in the long term trial at Höfchen (1959-1982). *Erwerbobstbau*, 25: 246-255.
- Lagarde, M.P. 1988.** Etude sur la maturation des ascospores de *Venturia inaequalis* (Cke.) Wint. En vue de l'élaboration d'un modèle. Second International Conference on Plant Diseases 8-10 Nov. 1988, Palais des congrès Bordeaux-Lac. *Annales II/III* (4): 1093 -1098.
- Lateur, M. 2001.** Perspectives de lutte contre les maladies des arbres fruitiers à pépins au moyen de substances naturelles inductrices d'une résistance systémique. *Biotechnologies, Agronomie, Société et Environnement*, 6 :67-77.
- Lefeuvre, M., Mémoire ingénieur DPE, 1995.** Lutte raisonnée contre la tavelure du pommier : validation d'un modèle d'aide à la décision. ENITHP Angers. 32p
- Leroux, P. 2003.** Résistance des champignons phytopathogènes aux fongicides: un phénomène difficile à maîtriser ? 7^{ème} Conférence internationale sur les maladies des plantes, Tours, France, 3-4-5 décembre 2003, p ?
- Leser, C., Treutter, D. 2005.** Effects of nitrogen supply on growth, contents of phenolic compounds and pathogen (scab) resistance of apple trees. *Physiologia plantarum*,123: 49-56.
- Lespinnasse, Y., Fouillet, A. 1990.** Création de variétés de pommiers résistantes à la tavelure : introduction de mécanismes de résistance à d'autres parasites. *Entretiens techniques – INRA Angers*, 57-59.
- Lespinnasse, Y., Parisi, L., Pinet, C., Laurens, F., Durel, CE. 1999.** Résistance du pommier à la tavelure et à l'oïdium. *Phytoma*, 514: 23-26.
- Li, B., Xu, X. 2002.** Infection and development of apple scab (*Venturia inaequalis*) on old leaves. *Journal of Phytopathology*, 150: 687-691.
- Louw, A.J. 1948.** The germination and longevity of spores of apple scab fungus, *Venturia inaequalis* (Cke.) Wint. *Union S. Afric. Sci. Bull.* 285. 19 pp.

- Louw, A.J. 1951.** Studies of the influence of environmental factors on the overwintering and epiphytology of apple scab (*Venturia inaequalis* [Cke.] Wint.) in the winter-rainfall area of the Cape Province. S. Africa Dept. Agric. Sci. Bull. 310. 48 pp.
- Luttrell, E.S. 1973.** Loculoascomycetes. In : The Fungi, G. C. Ainsworth, F. K. Sparrow, and A. S. Sussman, eds., vol. IV. P. 135-219.
- MacHardy, W.E. 1996.** Apple Scab Biology, Epidemiology and Management. APS Press, The American Phytopathological Society, Minnesota (USA), 545 pp.
- MacHardy, W.E. 2000.** Action threshold for managing apple scab with fungicides and sanitation. Acta horticultrae, 525: 123-131.
- MacHardy, W.E., Gadoury, D.M. 1986.** Patterns of ascospore discharge by *Venturia inaequalis*. Phytopathology, 76 : 985-990.
- MacHardy, W.E., Gadoury, D.M. 1989.** A revision of Mill's criteria for predicting apple scab infection periods. Phytopathology, 79: 304-310.
- MacHardy, W.E., Gadoury, D.M., Rosenberg, D.A. 1993.** Delaying the onset of fungicide programs for control of apple scab in orchards with low potential ascospore dose of *Venturia inaequalis*. Plant Disease, 77: 372-375.
- MacHardy, W.E., Berkett, L.P., Gotlieb, A.R., Sutton, D.K., Bergdahl, J. 2000.** Relationship between assessment of scab on apple leaves in autumn and ascospore production the following spring. IOBC wprs bulletin 23: 61-76.
- MacHardy, W.E., Gadoury, D.M., Gessler, C. 2001.** Parasitic and biological fitness of *Venturia inaequalis*: relationship to disease management strategies. Plant disease, 85: 1036-1051.
- Meszka, B., Bielenin, A. 2001.** The suppression of ascospore production of *Venturia inaequalis* and changes in the microbial population of apple leaves after autumn urea treatment. Bulletin OILB/SROP 24: 345-348.
- Meszka, B., Bielenin, A., Avilla, Polesny, F. 2003.** Autumn urea application and cold hardiness of apples trees. Acta Agrobotanica, 56: 117-125.
- Mills, W.D., LaPlante, A.A. 1951.** Diseases and insects in orchard. Cornell Ext. Bull. 711. 100 pp.
- Moller, W.J. 1981.** Efficacy of autumn urea in reducing spring inoculum of apple scab. California Plant Pathology 52: 1-2.
- Niklas, J., Kennel, W. 1981.** The role of the earthworm, *Lumbricus terrestris* (L.) in removing sources of phytopathogenic fungi in orchards. Gartenbauwissenschaft, 46: 138-142.
- Olivier, J.M. 1984.** Evolution de la lutte contre la tavelure du pommier. Defense des Végétaux, 225: 22-34.
- Olivier, J.M. 1986.** La tavelure du pommier. Conduite d'une protection raisonnée. Adalia, 1 : 3-19.
- Olivier, J.M., Lespinasse, Y. 1981.** Evolution des recherches sur la résistance du pommier a la tavelure. II. Etude du parasitisme et de lutte. 1^{er} colloque sur les recherches fruitières, INRA-Ctifl, Bordeaux, 1981 : 145-156.
- Osaer, A., Vaysse, P., Berthoumieu, J.F., Audubert, A., Trillot, M. 1998.** Gel de printemps, protection des vergers. Ed.. Ctifl (Paris), collection Hortipratic. 149 p.
- Palmiter, D.H. 1940.** Eradicant treatments as an aid in the control of apple scab. (Abstr.) Phytopathology 30: 18.
- Palmiter, D.H. 1946.** Ground treatments as an aid in apple scab control. N.Y. Agric. Exp. Stn. Bull. 714.
- Parisi, L., Durel C.E., Laurens F., 2000.** First report on the presence of *Venturia inaequalis* race 7 in french apple orchards. In: Parisi L. (ed) Integrated Control of Pome Fruit Diseases. Proc of 5th Workshop, Fontevraud-l'Abbaye, France, 24-27 August, 1999. IOBC/WPRS Bulletin Vol 23: 99-104.

- Parisi, L., Didelot, F., Brun, L. 2004.** Raisonner la lutte contre la tavelure du pommier: Un enjeu majeur pour une arboriculture durable. AFPP. 7^{ème} conférence internationale sur les maladies des plantes. Tours - France, 3-4-5 décembre 2003. p ?
- Prikshayat, S., Piotrowski, M., Kloppstech, K., Gau, A. E. 2004.** Investigations on epiphytic living *Pseudomonas* species from *Malus domestica* with an antagonistic effect to *Venturia inaequalis* on isolated plant cuticle membranes. *Environmental Microbiology*, 6: 1149-1158.
- Rapilly, F. 1991.** L'épidémiologie en pathologie végétale. Mycoses aériennes. INRA éditions (Paris), 317 pp.
- Raw, F. 1962.** Studies of earthworm population in orchards. I. Leaf burial in apple orchards. *Ann. Appl. Biol.* 50: 601-602.
- Ross, R.G. 1961.** The effect of certain elements, with emphasis on nitrogen, on the production of perithecia of *Venturia inaequalis* (Cke) Wint. *Ann. Appl. Biol.*, 62:289-296.
- Ross, R.G. et Burchill, R.T. 1968.** Expériences utilisant des portions stérilisées de feuilles de pommier pour étudier le mode d'action de l'urée dans la suppression des périthèces de *Venturia inaequalis*. *Ann. Appl. Biol.* Trad. SRPV. Experiments using sterilized apple-leaf discs to study the mode of action of urea in suppressing perithecia of *Venturia inaequalis* (Cke.) Wint. *Ann. Appl. Biol.*, 62: 289-296.
- Rossi, V., Giosuè, S., Bugiani, R. 2003.** A model simulating deposition of *Venturia inaequalis* ascospores on apple trees. *Bulletin OEPP/EPPO*, 33: 407-414.
- Rotem, J., Soham, Z., Lomas, J., Palti, J. 1996.** A contribution to the epidemiology of apple scab in Israel. *Israel J. Bot.* 15: 176-181.
- Rouzet, J., Vibert, J., 2000.** Conception et utilisation des modèles en agriculture. Colloque Pom'modèle, Evreux. Février 2000.
- Sanogo, S., Aylor, D.E. 1997.** Infection efficiency of *Venturia inaequalis* ascospores as affected by apple flower bud developmental stage. *The American Phytopathological Society*, 81, : 661-663.
- Schwabe, W.F.S. 1979.** Changes in scab susceptibility of apple leaves as influenced by age. *Phytophylactica*, 11: 53-56.
- Schwabe, W.F.S. 1980.** Wetting and temperature requirement for apple leaf infection by *Venturia inaequalis* in South Africa. *Phytophylactica* 12: 69-80.
- Schwabe, W.F.S., Matthee, F.N. 1971.** *Fusicladium* or scab of apples (*Venturia inaequalis*). *Deciduous Fruit Grower*, 21: 123-126.
- Seem, R.C., Gilpatrick, J.D., Szkolnik, M. 1979.** Quantitative effects of microclimate on spore development and dispersal systems of apple scab. *Proc. of Symposia IX, Int. Cong. Plant Prot.* 135-137.
- Shabi, E. Elisha, S., Zelig, Y. 1981.** Control of pear and apple diseases in Israel with sterol-inhibiting fungicides. *Plant Disease*, 65: 992-994.
- Simon, S., Lauri, P. E., Brun, L., Defrance, G., Girard, T., Sauphanor, B. 2006.** Does fruit-tree architecture manipulation affect the development of pests and pathogens ? A case in study in organic apple orchard. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 81: 765-773.
- Station d'Etudes et d'Expérimentation Fruitière Nord-Loire. 2006.** Etudes et résultats 2004-2005.
- Stensvand, A., Gadoury, D.M., Amundsen, T., Semb, L., Seem, R.C. 1997.** Ascospores release and infection of apple leaves by conidia and ascospores of *Venturia inaequalis* at low temperatures. *The American Phytopathological Society*, 87, n°10. p?
- Stensvand, A., Amundsen, T., Semb, L., Gadoury, D.M., Seem, R.C. 1998.** Discharge and dissemination of ascospores by *Venturia inaequalis* during dew. *Plant Disease*, 82: 761-764.
- Sutton, T.B., Jones, A.L., Nelson, L.A. 1976.** Factors affecting dispersal of conidia of the apple scab fungus. *Phytopathology*, 66: 1313-1317.

- Sutton, D.K., MacHardy, W.E. 1993.** The reduction of ascospore inoculum of *Venturia inaequalis* by orchard sanitation. *Phytopathology*, 83, 247
- Sutton, D.K., MacHardy, W.E., Lord, W.G. 2000.** Effects of shredding or treating apple leaf litter with urea on ascospore dose of *Venturia inaequalis* and disease buildup. *Plant Disease*, 84: 1319-1326.
- Swinburn, T.R. 1965.** Apple scab infection of the young wood of Bramley's seedling trees in Northern Ireland. *Plant Pathology*, 14: 23-25.
- Tartachnik, I. 1997.** Effect of high nitrogen fertilizer doses on the frost resistance, growth processes and fruit quality of apple trees. *Sadovodstvo I Vinogradarstvo*, 3: 7-9.
- Thakur, V.S., Sharma, R.D. 1999.** Effect of urea on microbial degradation of apple leaf litter and its relationship to the inhibition of pseudothecial development of *Venturia inaequalis*. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 69 : 147-151.
- Van Der Plank, J.E. 1968.** Resistance des plantes aux maladies. Trad. Barat, H. Agence de coop. cult. et tech.. 223 pp.
- Vanloqueren, G., Baret P.V. 2005a.** Des pommiers transgéniques pour lutter contre la tavelure ? Analyse systémique. *Le Fruit Belge*, 516 : 117-123.
- Vanloqueren, G., Baret P.V. 2005b.** Pourquoi les cultivars résistantes à la tavelure tardent-elles à se développer commercialement?. *Le fruit Belge*, 516 :111-115.
- Vincent, C., Rancourt, B., Carisse, O. 2004.** Apple leaf shredding as a non-chemical tool to manage apple scab and spotted tentiform leafminer. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104: 595-604.
- Wallace, E. 1913.** Scab disease of apples. N. Y. Agric. Exp. Stn. Bull. 335. 83 pp.
- Warner, J., Braun, P.G. 1992.** Discharge of *Venturia inaequalis* ascospores during daytime and nighttime wetting periods. I Ontario and Nova Scotia. *Can. J. Plant Pathol.*, 14: 315-321.
- Wood, P.N., Beresford, R.M. 2000.** Avoiding apple bud damage from autumn-applied urea for black spot (*Venturia inaequalis*) control. *New Zealand Plant Protection 53 Proceedings of a conference, Commodore Hotel, Christchurch, New Zealand, 8-10 August 2000* p. 382-386.
- Yoder, K.S., Klos, E.J. 1982.** Effects of selected herbicides on ascospore discharge of *Venturia inaequalis*. *Can. J. Plant Sci.* 62: 509-511.