

Sommaire

PARTIE 1/INTRODUCTION GENERALE.....	1
1-LA CANNE A SUCRE	1
1-1-Description de la plante.....	1
1-2-L'odyssée de la canne	2
1-3-Physiologie de la canne à sucre	4
1-4-Généétique de la canne à sucre	4
1-5-La culture de la canne à sucre	7
1-6-L'importance économique de la canne à sucre.....	8
1-7-Les ennemis et les maladies de la canne à sucre	9
2-LES ANTILLES	11
2-1-La Guadeloupe.....	13
2-2-La Martinique	14
2-3-Aperçu historique de la canne à sucre aux Antilles françaises	16
3-INTRODUCTION A LA MALADIE DE LA FEUILLE JAUNE	18
3-1-Physiologie et symptômes de la maladie	19
3-2-Agent causal de la maladie	19
3-3-Le vecteur du SCYLV.....	22
3-4-Aspect de la transmission du SCYLV	24
3-5-Contrôle de la maladie	28
4-QUESTION DE RECHERCHE.....	30
5-OBJECTIFS DE L'ETUDE	30
PARTIE 2/ CARACTERISATION DE LA DISSEMINATION DU SCYLV DANS LES ZONES DE PRODUCTION DE GUADELOUPE ET MARTINIQUE	31
1-INTRODUCTION.....	31
1-1-ORGANISATION DE LA FILIERE CANNE-SUCRE-RHUM	31
1-2-REPARTITION DES CULTIVARS DANS LES BASSINS CANNIERS	33
2-ETUDE DE LA REPARTITION DU SCYLV AUX ANTILES FRANCAISES	37
2-1-Matériel et méthodes.....	37
2-2-Résultats	46
2-3-Conclusion et discussion.....	63
PARTIE 3/CONTAMINATION DE PLANTS SAINS DE CANNE A SUCRE AU CHAMP PAR LE SCYLV	67
1-INTRODUCTION ET SYNTHESE DE L'ARTICLE:.....	67
Aspects mathématiques	69
2-PUBLICATION : Modeling spatio-temporal epidemic spread of <i>Sugarcane Yellow Leaf Virus</i> using point processes	72
3-ESSAI TROIS CULTIVARS	95
3-1-Matériel et méthode	95
3-2-Résultats	97
3-3-Conclusions et discussion.....	99
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	100
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	102
ANNEXES.....	108
LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS.....	126

PARTIE 1/INTRODUCTION GENERALE

1-LA CANNE A SUCRE

Avec un volume annuel de production d'environ 1,29 milliards de tonnes (Faostat 2005), la canne à sucre, *Saccharum sp.* est la première culture au plan mondial. Elle est principalement cultivée pour ses tiges dont on extrait du sucre et de l'éthanol (Brésil)...

Elle est classée dans la famille des *Poaceae*, sous-famille des *Panicoideae*, tribu des *Andropogoneae*. Parmi les *Poaceae*, on trouve des espèces essentielles dans l'économie mondiale, et dont l'utilisation est vitale pour l'alimentation de l'homme et du bétail.

1-1-Description de la plante

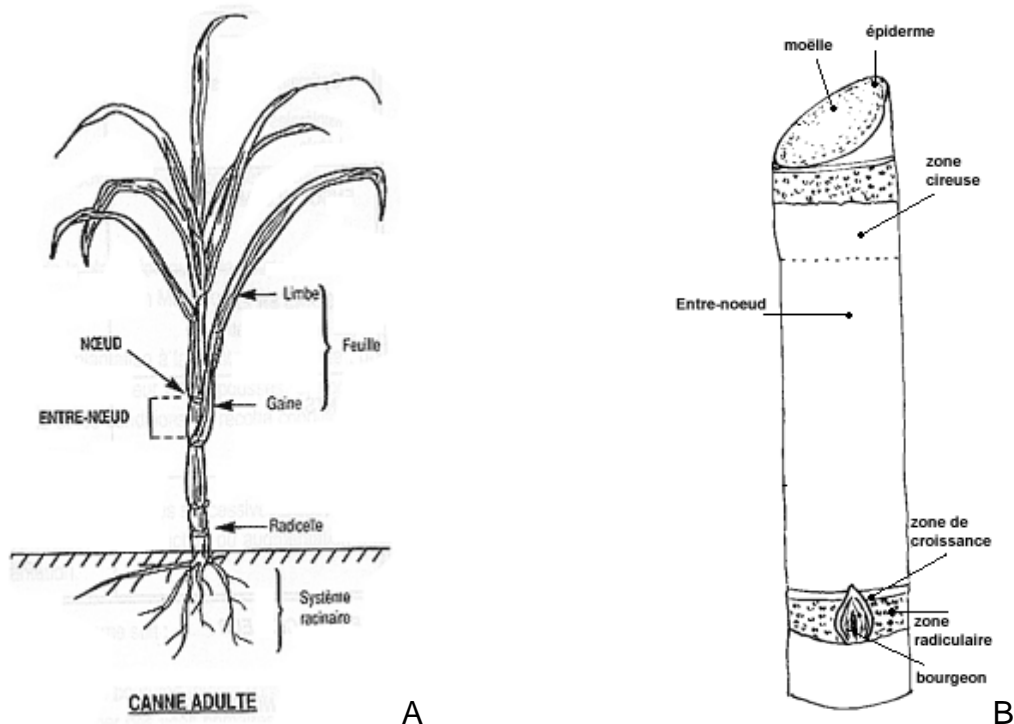


Figure 1 : Schéma d'une canne adulte (A) et détail des zones caractéristiques de la tige (B)

La canne à sucre est une plante à grand nombre de chromosomes. Elle est constituée de 99% de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. De culture pluriannuelle, son cycle dure 4 à 10 ans.

Les tiges sont constituées d'entrenœuds et de nœuds successifs (Figure 1A). Les bourgeons sont alternes et la gaine est enveloppante. Après la maturation, il peut y avoir 20 à 30 entrenœuds de 10 à 20 cm de long. La longueur des entrenœuds varie avec le climat et la nutrition. La tige atteint généralement 2 à 3 mètres pour un diamètre de 2 à 4 cm. Les tiges sont regroupées en touffes de 5 à 20 tiges sous l'action du tallage. La couleur varie en fonction de la variété et de l'exposition au soleil.

La canne à sucre se multiplie par boutures. Une bouture est une partie de la tige qui comporte au moins un bourgeon ou « œil » voire trois ou quatre (Figure 1B).

Les racines de boutures, passagères, minces, ramifiées et superficielles laissent la place aux racines de tiges plus directes, plus longues et plus durables. Elles servent à l'absorption et la fixation. Elles sont très sensibles à l'excès d'humidité, au manque d'air et à la température du sol.

Les feuilles sont alternes et composées d'une gaine et d'un limbe reliés par une articulation, appelée ochréa, souvent caractéristique de la variété. Le limbe est lui aussi caractéristique par sa couleur, son port, sa taille,... Il peut mesurer 2 à 10 cm de large et 60 à 150 cm de long (Fauconnier, 1991).

1-2-L'odyssée de la canne

Saccharum officinarum a été domestiquée dès 8000 avant J.C. en Nouvelle Guinée. Progressivement, elle a été diffusée vers la Chine et l'Inde à l'ouest et vers les îles du Pacifique à l'est. D'autres espèces, issues de croisements naturels interspécifiques ont été cultivées telles que *S. sinense* en Chine et *S. barberi* en Inde. La production de sucre à partir de canne à sucre se faisait déjà en Inde 3000 ans avant J.C (Fauconnier, 1991).

A partir de 500 avant J.C., les Perses apportèrent *S. barberi* jusqu'à la Méditerranée (Fauconnier, 1991). Vers 326 avant J. C., lors de son expédition militaire en Inde, Alexandre le Grand découvrit ce « roseau qui donne du miel sans le secours des abeilles ». Les Arabes la diffusèrent jusqu'au Maroc à partir du VIII^e siècle et firent de gros progrès en techniques de cultures et de fabrication du sucre (Fauconnier, 1991).

Au XV^e siècle, les Espagnols et les Portugais l'introduisent dans leurs possessions africaines : Madère, Açores, Canaries, Sao-Tomé, Cap-Vert (Figure 2). La canne à sucre fut introduite dans les Antilles par Christophe Colomb lors de son second voyage, où grâce au climat favorable sa culture a rapidement prospéré. La propagation de la canne atteint rapidement toute l'Amérique centrale, notamment Saint-Domingue, Cuba, le Mexique et la

Louisiane. Jusqu'au XVe siècle, l'Europe était fournie par la Syrie, Chypre, la Crète, la Sicile, l'Egypte et le Maroc, puis par les îles de l'Atlantique aux XVe et XVIe siècle et au XVIIe par les îles à sucre des Antilles et le Nord-Est du Brésil (Fauconnier, 1991).

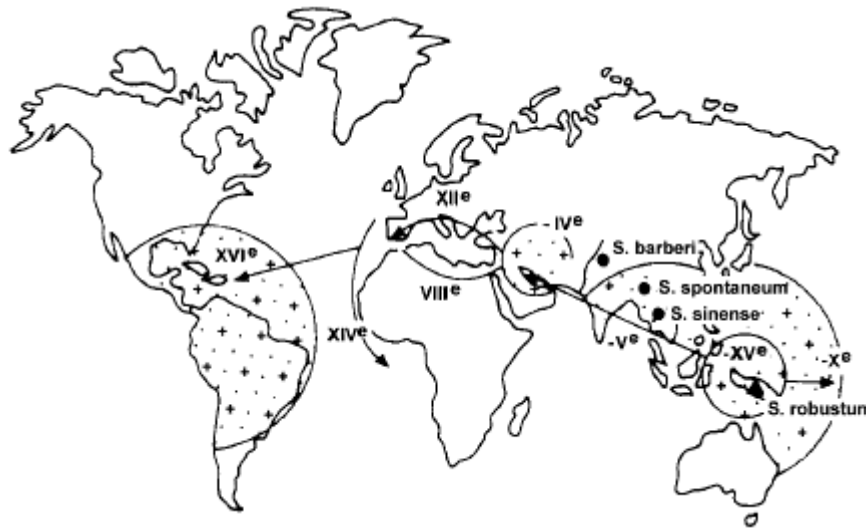


Figure 2 Diffusion de la canne. (d'après Fahrasmane-Ganou-Parfait/INRA)

S. barberi fut remplacée par la canne dite « noble » *S. officinarum* originaire de Nouvelle Guinée (Fauconnier, 1991). Elle serait la descendante de la canne sauvage *Saccharum robustum* venue d'Indonésie. C'est le début de l'ère moderne avec la mondialisation de la canne et l'apparition de l'industrie (Fauconnier, 1991).

Jusqu'au XVII^e siècle, le sucre était une denrée rare et on lui prêtait de nombreuses vertus médicinales. Certains médecins avaient même l'habitude de prescrire des doses de sucre à leurs patients. C'est de cet usage officinal que vient le nom latin de la canne : *Saccharum officinarum*.

Aujourd'hui, la canne est cultivée en Océanie, sa région natale, en Asie, en Afrique, en Amérique centrale, en Amérique du Sud, mais aussi en Amérique du Nord (Louisiane, Floride), dans la Caraïbe et dans le sud de l'Europe (Espagne et Portugal) (Fauconnier, 1991).

1-3-Physiologie de la canne à sucre

Comme le maïs et le sorgho, la canne à sucre fait partie des plantes dites de « type C4 ». Grâce à leur métabolisme spécial, ces plantes ont une meilleure capacité à absorber le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO₂) et l'énergie lumineuse que les autres plantes. Elles rejettent par conséquent beaucoup d'oxygène et produisent une biomasse importante. Lors de la photosynthèse, les feuilles de canne synthétisent un sucre, appelé saccharose, qui descend vers la tige où il est accumulé comme réserve énergétique.

L'absorption de l'eau et des éléments minéraux a lieu principalement au niveau des racines. Les feuilles jouent également un rôle dans l'absorption en utilisant la rosée et les solutions nutritives. L'absorption est nulle en dessous de 15°C, très faible au dessous de 20°C et maximale pour une température de l'air entre 28 et 30°C. La quasi-totalité de l'eau est transpirée dans la journée par régulation thermique. La respiration est maximale vers 37°C parce qu'en cas de hautes températures et de manque de lumière, il y a perte de carbone dans la plante. Plus le feuillage est développé, plus la plante transpire, à condition que les conditions climatiques soient favorables.

L'assimilation, qui permet de synthétiser le glucose à partir du CO₂ et de l'énergie lumineuse, est maximale vers 30-32° et plus active à la base des jeunes feuilles. La synthèse en saccharose et polysaccharides peut se poursuivre sans lumière. La migration des sucres et leur accumulation dans la tige ont lieu de jour comme de nuit (Fauconnier, 1991).

1-4-Génétique de la canne à sucre

1-4-1-Les variétés de canne à sucre

L'origine génétique de la canne à sucre n'est pas bien établie. L'espèce *S. barberi* a été introduite par les Arabes jusqu'au Maroc et par Christophe Colomb dans les Antilles. C'est la principale espèce cultivée dans les Amériques et en Afrique, jusqu'à la fin du XVIIIe siècle. *S. robustum* et *S. officinarum* ont été sélectionnés et diffusés à partir de Tahiti puis des Mascareignes par les français dans la seconde moitié du XVIIIe siècle (Figure 2). Ce n'est que vers la fin du XIXe siècle que l'on a découvert que la graine de canne pouvait germer et donner de nouvelles plantes. Les premiers croisements dirigés sont réalisés entre des variétés de l'espèce *S. officinarum* uniquement. Puis au début du siècle, en Inde et à Java, les variétés de l'espèce non sucrée *S. spontaneum*, hybridés aux variétés de l'espèce *S.*

officinarum, ont permis de rendre de la vigueur aux cannes cultivées. Les croisements interspécifiques sont devenus plus complexes, c'est la nobilisation (Fauconnier, 1991).

Les variétés actuelles sont des clones hybrides issus de graines. Sur une parcelle, les cannes sont génétiquement semblables parce qu'elles ont été obtenues par bouturage à partir du même clone. Sur une zone de culture, plusieurs variétés sont utilisées ce qui permet une meilleure adaptation aux conditions environnementales et au calendrier de culture.

1-4-2-Obtention de clones en station de sélection

La création variétale est coûteuse car il faut des moyens suffisants, des généticiens améliorateurs et du temps afin d'obtenir des variétés de meilleure qualité que celles qui sont cultivées. Les hybridations sont effectuées sous des lanternes afin de contrôler la pollinisation. Les nombreuses graines sont semées en casiers, arrosées et engraisées. Les plantules sont repiquées à un ou deux mois puis installées en planches à trois ou quatre mois. Les plantules sont ensuite sélectionnées. Les variétés excellentes en un lieu sont souvent bien adaptées à la culture dans d'autres pays. Les échanges variétaux entre différents pays se font sous forme de boutures. Afin d'éviter d'importer par ce biais des maladies, les variétés sont placées sous contrôle en quarantaine. Ces variétés sont répandues dans le monde entier et servent souvent de géniteurs lors de croisements dirigés. Toutefois, l'effet du génotype et de l'environnement est important dans la culture de la canne à sucre. Plus les conditions écologiques et économiques d'une zone de culture de canne sont particulières et spécifiques, et plus il y a de chances de pouvoir créer pour elles, par hybridation et sélection des variétés bien adaptées. Les croisements variétaux sont réalisés en fonction des besoins : dégénérescence progressive des variétés due à la faiblesse des repousses, au manque de richesse en sucre, à une sensibilité aux maladies et parasites, à un besoin de s'adapter aux conditions locales (Fauconnier, 1991)...

1-4-3-Sélection variétale

Il faut 7 à 12 ans pour sélectionner une ou quelques variétés à partir des 50 000 à 2 000 000 de graines semées chaque année par une station de sélection. Les principaux critères de sélection sont :

- la vigueur végétative : grosse production à l'hectare en vierge et surtout en repousse ;
- une bonne richesse en sucre et une pureté élevée : à tonnages égaux de sucre par hectare, on préférera la variété la plus riche ;
- des qualités de précocité qui permettent d'avancer avec profit le début de la campagne sucrière ou au contraire de tardivité qui permettent d'allonger la campagne ;
- une résistance suffisante à toutes les maladies graves du pays et une tolérance éventuelle à certains ennemis ou à certaines conditions environnementales ;
- une culture facilitée et à faible coût.

Il existe deux étapes de sélection, la sélection en station d'hybridation et la sélection finale. La sélection en station d'hybridation qui fait appel à des sélectionneurs en collaboration avec des statisticiens et des phytopathologistes et traite un nombre très élevé de clones. La sélection finale ou régionale ou sélection d'usine compare des petits nombres de variétés déjà remarquées par la station locale ou dans des zones d'où elle a été importée (Fauconnier, 1991). Cependant, plus tôt la sélection est délocalisée, plus les chances de trouver des variétés adaptées à l'environnement ciblé augmentent.

Reconnaissance et nomenclature des variétés

Les variétés de canne sont facilement reconnaissables en culture. Les tiges sont caractérisées par leurs couleur, diamètre, densité, port, forme des bourgeons,..., et les feuilles par leurs port, souplesse, largeur, couleur, ochréa, ligule, gaine, poils, taches foliaires, chute naturelles...

Généralement, dans la nomenclature des variétés, une lettre ou un groupe de lettre indique un pays, la région, l'organisme ou la station de création. Les deux groupes de chiffres précisent l'année de semis ou de première sélection et le numéro d'ordre. L'International

Society of Sugarcane Technologists (ISSCT) coordonne et enregistre la répartition des sigles dans le monde (Fauconnier, 1991).

Conservation et échange des variétés

Les variétés sont conservées dans des collections plus ou moins importantes dans chaque pays. Le matériel végétal peut également être conservé *in vitro* dans des tubes à essai. Les variétés peuvent ainsi être exportées sous cette forme (Fauconnier, 1991) si les garanties sanitaires sont respectées.

1-5-La culture de la canne à sucre

La croissance de la canne est limitée par le gel et la sécheresse. Il faut à cette culture au moins 1000 mm annuels de pluie sur des sols à bonne rétention d'eau. Par contre, si les précipitations dépassent 3000 mm, la canne a des difficultés à mûrir. La canne est cultivée aussi bien sur des argiles que sur des tourbes ou sur des sols sableux. Elle est parfaitement adaptée aux conditions d'ensoleillement et de température intenses. Un sol aéré et irrigué est cependant plus adapté.

Le cycle de culture de la canne comprend: la plantation, la levée, le tallage, la croissance, la floraison, la maturation et la récolte (Figure 4). Le tallage est l'émission de jeunes tiges d'un rang inférieur. A la fin de la croissance, le taux de saccharose augmente dans la tige, la quantité d'eau diminue ainsi que le glucose et l'acidité, c'est la maturation. La période de maturation varie selon le climat et la région. La récolte intervient généralement entre neuf et douze mois après la plantation sous les climats très chauds, au moment où la canne présente la plus grande richesse en sucre. Les cannes sont coupées au ras du sol, la concentration en sucre étant maximale dans la partie basse de la tige. La coupe se fait encore beaucoup à la main, mais la coupe mécanique se généralise. Dans les DOM, la coupe manuelle se fait encore très peu. Pour faciliter la coupe, on brûle parfois les feuilles sèches au préalable. Cette pratique est progressivement abandonnée car elle est polluante, diminue la qualité des tiges et perturbe les équilibres biologiques. Etant donné que les souches émettent de nouvelles tiges, il n'est pas nécessaire de replanter avant trois ou quatre ans.

La canne récoltée sous forme de tronçons de tiges est transportée dans une sucrerie ou une distillerie. Les tiges broyées dans un moulin produisent un liquide sucré, le vesou, et un résidu fibreux, la bagasse. Cette dernière, composée essentiellement de cellulose et de lignine, est utilisée pour faire du papier et de la nourriture pour le bétail. La bagasse peut également être utilisée comme combustible afin de produire de la chaleur et de l'électricité, comme c'est le cas à la Réunion, à l'île Maurice et à la Guadeloupe. Le vesou est concentré pour extraire le sucre cristallisé brut, la cassonade. Ce sucre est ensuite transformé en sucre blanc dans une raffinerie. Le résidu liquide, encore très sucré, noirâtre et visqueux, est appelé mélasse. Elle est riche en substances minérales et organiques et peut être utilisée pour l'alimentation du bétail ou, après fermentation, pour produire de l'eau de vie, du rhum ou du biocarburant. Les impuretés évacuées lors de l'obtention du sirop sont appelées écumes. Elles peuvent servir d'engrais.

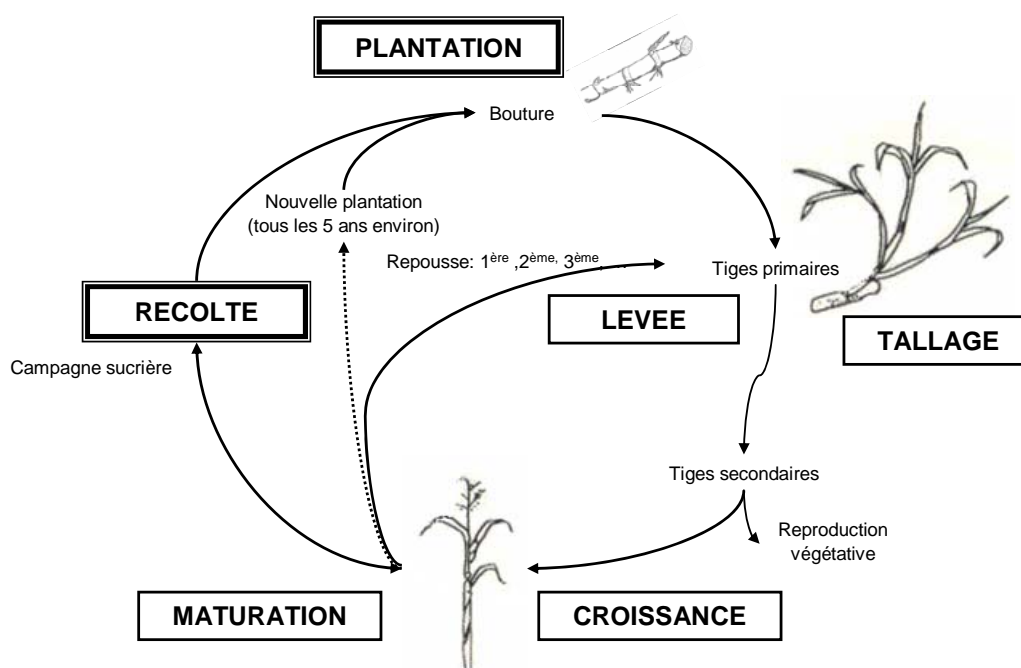


Figure 3. Cycle de culture de la canne à sucre (d'après Fauconnier, 1991)

1-6-L'importance économique de la canne à sucre

L'aire de culture de la canne à sucre s'étend sur près de 20 millions d'hectares. En 2005, les plus gros producteurs de sucre étaient le Brésil (33 millions de tonnes), l'Inde (25,5 millions de tonnes) et la Chine (12,5 millions de tonnes). La France, qui cultive la canne dans ses départements d'outre mer et la betterave en métropole est le huitième producteur mondial de

sucre avec 3,9 millions de tonnes. Le plus important producteur de sucre de canne européen est la Réunion. Cependant, la concurrence du sucre de betterave n'est pas négligeable. Cette plante fournit le quart de la production mondiale de sucre. Parmi les 114 pays qui produisent du sucre, 67 cultivent la canne, 38 cultivent la betterave et 9 cultivent les deux (Figure 4).

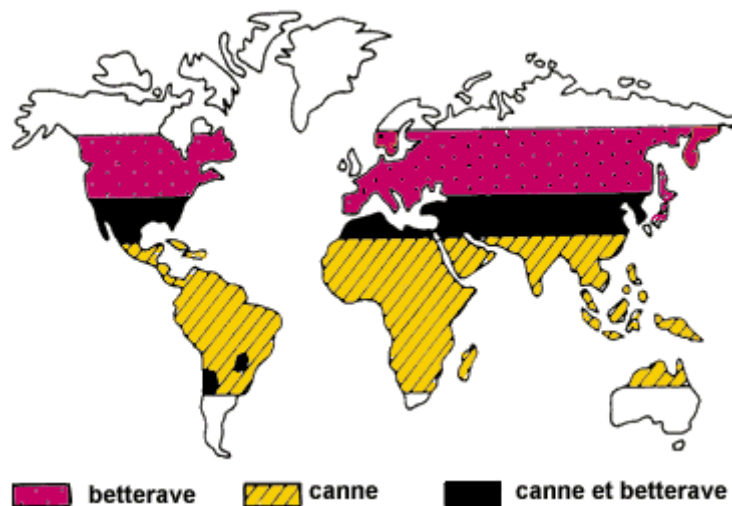


Figure 4. Répartition des zones de culture de la canne à sucre et de la betterave.

1-7-Les ennemis et les maladies de la canne à sucre

Les maladies et les ennemis de la canne sont très nombreux et ont souvent un impact important sur le rendement des cultures. Il peut s'agir d'insectes et de rongeurs, mais aussi de champignons, de bactéries et de virus. Ils infligent parfois d'importants dégâts et peuvent provoquer des pertes de rendements significatives. Beaucoup d'efforts de recherche sont donc investis pour lutter contre les ennemis de la canne.

1-7-1-Les principaux ravageurs de la canne à sucre

Contrairement aux maladies, les ennemis de la culture sont en général spécifiques des zones géographiques. On distingue les foreurs des tiges, les chenilles défoliatrices, les rats, les insectes piqueurs des feuilles et des tiges...

Les pertes totales dues aux borers ou chenilles foreuses (*Diatraea saccharalis*, *D. centralis*, *D. impersonatella*) sont estimées à 10% de la récolte mondiale. La lutte contre les borers est difficile car il est protégé par la tige où il se loge.

Parmi les chenilles phyllophages ou défoliatrices (*Laphygma frugiperda*, *Ciphis loreyu*, *Mocis puncturalis*) certaines dévorent très vite les limbes puis disparaissent et d'autres déforment seulement les feuilles pour s'y nicher. La lutte contre les chenilles, essentiellement chimique, est rarement efficace, car elle est souvent trop tardive.

Les pertes dues aux rats (*Rattus norvegicus*, *R. rattus*) peuvent être considérables. Ils se réfugient dans les abords abandonnés des champs de canne, et consomment les entrenœuds du bas de la tige. Ils préfèrent les cannes sucrées et peu ligneuses. La lutte contre les rongeurs consiste généralement à déposer des appâts empoisonnés à l'intérieur des champs ou sur leur passage.

Les insectes piqueurs (*Saccharosydne saccharivora*, *Sipha flava*, *Melanaphis sacchari*) sont à redouter en cas de pullulation car ils freinent la croissance de la plante et transmettent de graves maladies (Fauconnier, 1991). La lutte chimique contre les insectes piqueurs suceurs consiste en l'utilisation d'aphicides de contact ou systémiques. Cependant, ces produits sont à utiliser avec précaution, et doivent être appliqués régulièrement. Les prédateurs naturels des insectes piqueurs suceurs peuvent réduire les populations de ces derniers.

1-7-2-Les principales maladies de la canne à sucre

Plus d'une soixantaine de maladies de la canne ont été recensées. Certaines sont causées par des bactéries, d'autres par des champignons ou d'autres encore par des virus (Rott *et al*, 2000). Les maladies qui sont présentées ci-après sont considérées comme les plus graves.

Parmi les maladies causées par des champignons on distingue

- Le charbon dont l'agent causal est *Ustilago scitaminea*
- Le mildiou : *Sclerospora sacchari*
- La rouille : *Puccinia melanocephala*
- La morve rouge : *Colletotrichum falcatum*
- Le « pokkah boeng » : *Fusarium moniliforme*, *F. subglutinans*
- Le « Ring spot » : *Leptosphaeria sacchari*

Parmi les maladies bactériennes on distingue

- l'échaudure des feuilles : *Xanthomonas albilineans*
- La Gommose : *X. axonopodis* pv *vasculorum*
- Le rabougrissement des repousses : *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*

Parmi les maladies virales on peut citer :

- La maladie de Fidji : *Fidji virus*

- la maladie des feuilles jaunes : *Sugarcane Yellow Leaf Virus*
- les mosaïques : *Sugarcane mosaic virus*, *Sugarcane streak mosaic virus*.

1-7-3- Quelques éléments sur la lutte contre les maladies de la canne à sucre

Les boutures peuvent véhiculer la majorité des maladies citées, d'où l'importance des stations de quarantaine et de pépinières saines. La lutte comporte toujours l'utilisation de variétés résistantes d'où l'importance de la sélection variétale. Cependant, les nouvelles variétés sélectionnées peuvent être sensibles à d'autres maladies que celles intégrées au schéma de sélection ou même à d'autres formes de ces maladies. Elles peuvent également être tolérantes et par conséquent porteuses de la maladie et dangereuses pour les autres variétés. La lutte curative (thermothérapie) ou préventive (désinfection des instruments, arrachages) sanitaires est réservée aux pépinières. De plus, certaines maladies ont des hôtes alternatifs, ce qui empêche leur éradication.

Les symptômes des maladies virales et bactériennes sont complexes et peuvent prendre des formes plus ou moins typiques. Des confusions sont possibles entre maladies, accidents végétatifs, piqûres d'insectes, carences en nutriments ou en eau, et effets de produits chimiques tels que les herbicides. Par conséquent, les diagnostics sérologiques et moléculaires sont très utilisés et souvent nécessaires pour conclure sur l'état sanitaire de la plante (Fauconnier, 1991).

2-LES ANTILLES

En France, la canne à sucre est cultivée dans plusieurs départements d'outre mer : essentiellement en Guadeloupe et en Martinique, du côté des Antilles, et à l'île de la Réunion, dans l'océan Indien.

L'Archipel des Antilles forme un arc de cercle de 3 500 km du Golfe du Mexique au large du Venezuela, bordé à l'ouest, par la Mer des Antilles ou Mer des Caraïbes et à l'est par l'Océan Atlantique. La Guadeloupe et la Martinique, font partie des îles sous le vent dans l'arc des Petites Antilles (Figure 5).

La température moyenne est de 27°C, elle peut atteindre 32°C et descendre la nuit vers 16°C. L'ensoleillement est de 11 à 13 heures par jour.

On peut distinguer aux Antilles, deux saisons principales : une saison sèche, « le carême », et « l'hivernage » caractérisé par des pluies fréquentes et intenses. Le carême s'étend de décembre à mai. C'est le régime anticyclonique. L'alizé soufflant d'est à nord-est est une caractéristique déterminante du climat. Il souffle en quasi-permanence entre 30 à 50 km/h. Le flux d'alizé est régulier et soutenu en force et en direction ce qui procure une importante ventilation. Les températures maximales atteignent 28 à 30 C l'après-midi. Le temps est ensoleillé et peu pluvieux. Les rares averses sont chaudes et de courte durée. L'hivernage s'étend de Juillet à Octobre. Le climat est plus chaud et plus humide. Les averses sont plus nombreuses et parfois intenses. Les températures sont plus élevées et atteignent 31 à 32°C l'après-midi. L'humidité est très forte, et les alizés sont souvent plus faibles et irréguliers. Le carême et l'hivernage sont séparés par deux intersaisons plus ou moins marquées. Vers la fin du mois de juin, la période cyclonique débute. Certaines perturbations atmosphériques issues d'Afrique, pourront évoluer en dépression tropicale, tempête tropicale ou parfois même en ouragan, si les conditions atmosphériques et océaniques sont propices. Lors du passage de ces perturbations cycloniques les rafales peuvent être bien plus conséquentes qu'en Carême.

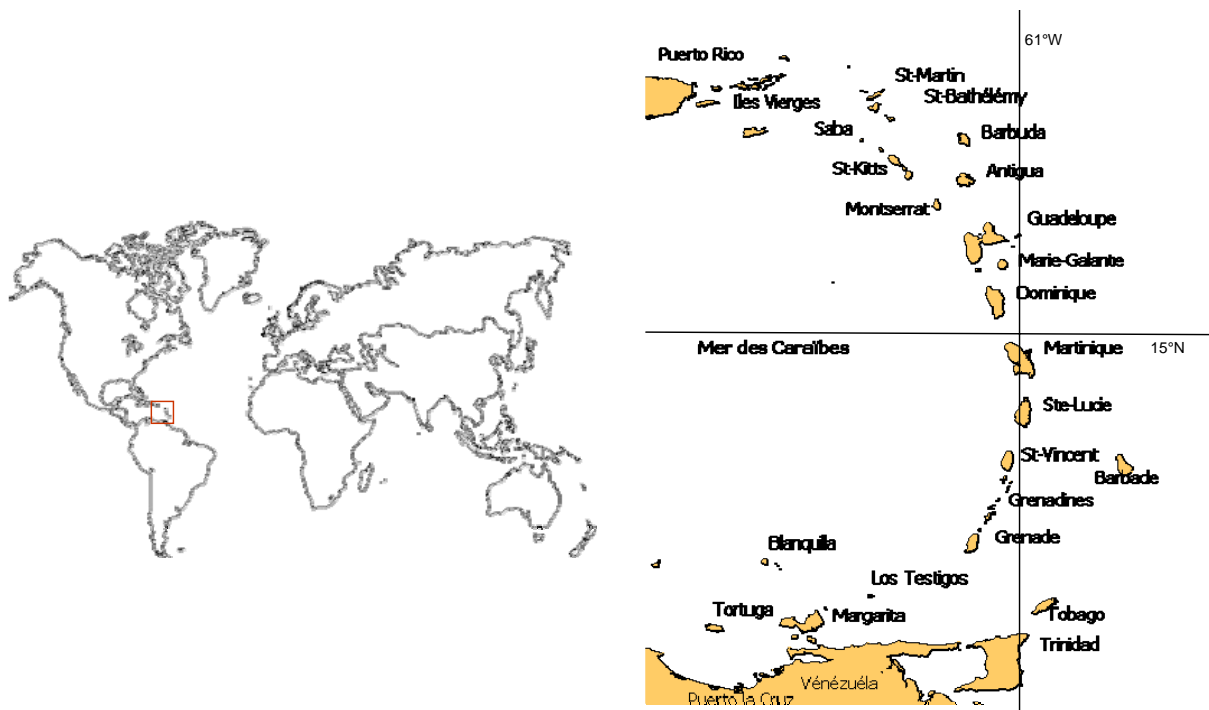


Figure 5. Situation géographique de l'arc antillais.

2-1-La Guadeloupe

2-1-1-La situation géographique

L'île est située entre 15°57' et 16°31' de latitude nord, et entre 61°10' et 61°48' de longitude ouest. Elle forme un archipel de 1 703 km², comprenant deux îles principales formant la Guadeloupe dite « continentale » et six autres îles appelées « dépendances ». La Guadeloupe « continentale » est constituée de deux îles principales : la Basse-Terre, montagneuse, culminant au volcan de la Soufrière (1 467 m), et la Grande-Terre, calcaire, sans grand relief. La Grande-Terre et la Basse-Terre sont séparées par un mince bras de mer, "la Rivière Salée". (http://www.meteo.fr/temps/domtom/antilles/pack-public/meteoPLUS/climat/climat_guad.htm).

A proximité, sont situés la grande île de Marie-Galante, la Désirade, et l'archipel des Saintes avec Terre-de-Haut et Terre-de-Bas. Deux cent kilomètres plus au nord, se situent les îles de Saint-Barthélemy et de Saint-Martin (Figure 6). Seule Marie-Galante est concernée par la culture de la canne à sucre.

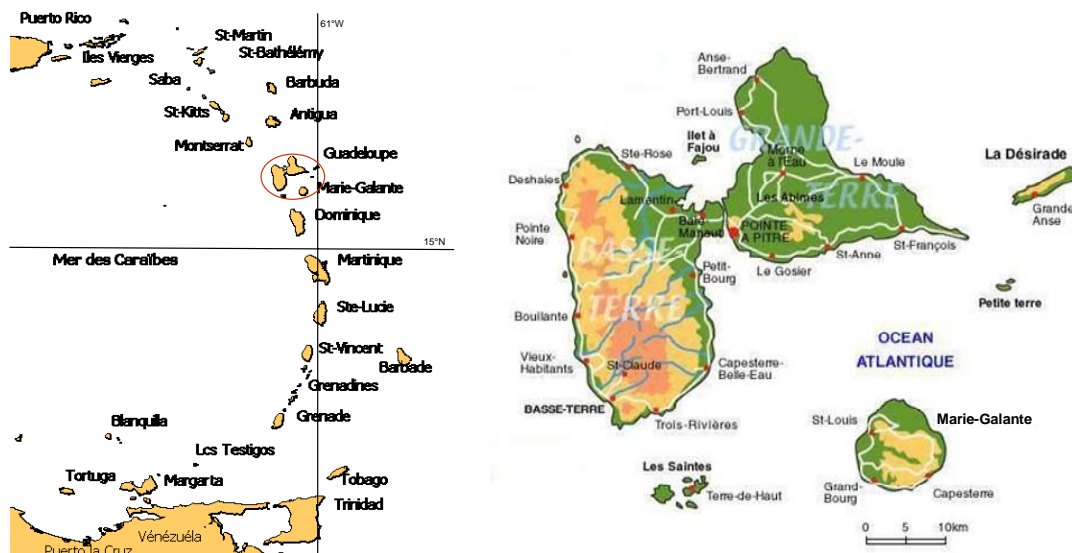


Figure 6. Situation des îles de l'archipel Guadeloupe dans l'arc antillais.

2-1-2-Place de la culture de la canne dans l'économie

L'agriculture emploie 12% de la population active en Guadeloupe et couvre le tiers de la superficie de l'île. Elle contribue pour 6 % au produit brut régional. La banane et la canne à

sucre sont les principales productions agricoles. La surface agricole utilisée (SAU) occupe 25,8% du territoire. En 2006, les terres arables se répartissaient sur plus de 23 000 hectares, soit 13,5% de la superficie totale de l'archipel guadeloupéen. Les cultures industrielles couvrent à elles seules la majorité des terres arables grâce à la canne à sucre avec 62%.

La culture de la canne à sucre représente la première activité agricole. Elle représente 28,3% de la valeur ajoutée du secteur primaire, en 2006. Avec environ 14000 hectares, la production totale de canne en 2006, s'élève à 787 286 tonnes dont 91,1% sont destinées aux usines sucrières et 7,2% aux distilleries.

La sole melonnière, avec 490 hectares, couvre 24,5% des cultures légumières. La banane demeure un des piliers de l'économie agricole du département avec 19,9% de la valeur ajoutée du secteur primaire. La production de banane est de 53 250 tonnes dont 46 370 tonnes sont exportées, ce qui est inférieur au quota de 150 000 tonnes nettes ouvert à la Guadeloupe sur le marché communautaire. La superficie consacrée à la culture de la banane est évaluée à 2 130 hectares soit 9,2% des terres arables du département (source Agreste, 2006).

2-2-La Martinique

2-2-1-La situation géographique

L'île de la Martinique, est située dans la zone intertropicale entre 14°23' et 14°53' de latitude nord, et entre 60°50' et 61°15' de longitude ouest. Sa superficie est de 1128 km², la plus grande longueur est de 80 km et la plus grande largeur de 40 km. Le principal volcan, la Montagne Pelée (1 397 m) situé au nord de l'île, est sous surveillance permanente. La Pelée est liée un peu plus au Sud aux Pitons du Carbet (1 196 m) qui, eux, sont des volcans éteints (Figure 7).

La moitié nord de l'île est recouverte par la forêt tropicale à la végétation luxuriante. Au centre la plaine est une zone de marécages asséchés artificiellement. Au sud, le paysage est fait de plaines et de monts plus arides. Les nuages sont balayés par les alizés, ne laissant que peu d'opportunités de pluies.

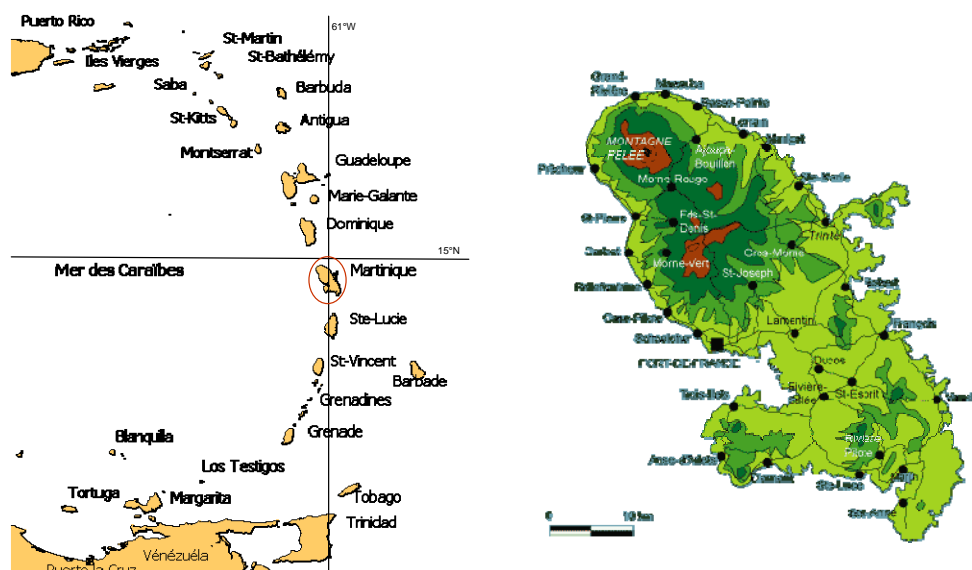


Figure 7. Situation de la Martinique dans l'arc antillais.

2-2-2- Place de la culture de la canne dans l'économie

L'agriculture martiniquaise occupe 30% de la surface de l'île, emploie 12% de la population active et assure 6% du produit brut régional. La SAU occupe 25,4% du territoire.

Le secteur primaire demeure la principale source de recettes à l'exportation de l'île. L'agriculture, avec la banane, la canne à sucre, le rhum, le melon et l'ananas, fournit les principales exportations de la Martinique. Les principales productions sont la banane et le rhum.

La banane est la première production agricole et la principale ressource économique de l'île avec en 2006, 43,9% des terres arables. La production martiniquaise est environ de 240 878 tonnes, dont moins de 10% est écoulee localement. Cela représente 65,1% des recettes de la production végétale. La culture de la banane modèle l'aménagement et le paysage dans l'intérieur martiniquais.

La canne à sucre est la seconde activité agricole de l'île, avec une contribution très importante en terme social. L'emploi dans la filière est estimé à 3 700 personnes dont 1 400 salariés et 2 300 emplois indirects (transport, commercialisation). La sole cannière couvre une surface de l'ordre de 3 600 hectares et la production est assurée par 260 à 280 planteurs. Elle s'élève à 220 000 tonnes en moyenne, dont 55 à 65% sont destinés aux distilleries agricoles et 35 à 45% à l'Usine sucrière du Galion. Le rhum est le produit

emblématique de la Martinique, et la première activité agro-industrielle. Les exportations de rhum agricole se composaient en 2004, de 88% de rhum blanc, 10% de rhum élevé en fut et 2% de rhum vieux (source : Agreste 2006, CTCS).

2-3-Aperçu historique de la canne à sucre aux Antilles françaises

2-3-1-La Guadeloupe, la canne à sucre et le rhum

Le sucre a joué un rôle extrêmement important dans la formation de la société en Guadeloupe. Depuis l'installation des français en 1635, la Guadeloupe est une économie de petites propriétés. Les propriétaires y pratiquent la polyculture avec l'indigo, le coton, le gingembre et le tabac essentiellement. En 1640, le sucre apparaît, et la canne commence à se développer.

En 1654 des juifs chassés du Brésil importent en Guadeloupe les techniques de fabrication et de blanchiment du sucre. Le sucre quittant l'île peut ainsi être directement consommé. Les usines de raffinage de la métropole ne sont donc plus nécessaires. Le développement de la production du sucre entraîne la concentration foncière, le développement de la population servile et la naissance d'une « élite sucrière » qui domine toute la société antillaise.

En 1775, La Guadeloupe possède 334 moulins et exporte du rhum, en particulier lors de l'occupation britannique entre 1759 et 1763. L'île vend surtout de la mélasse aux colonies anglaises d'Amérique du nord, très peu en France. La production de rhum est consommée sur place à 93%.

Le blocus continental instauré par Napoléon contre les Anglais en 1806 contribue à activer les recherches sur la fabrication de sucre à partir de la betterave. Dès 1830, la production de sucre de betterave commence à devenir importante. De plus, d'autres colonies, notamment Cuba et les îles Hawaï, développent la production de sucre. Il devient nécessaire de trouver le moyen de vendre moins cher en Europe et ne pas subir ainsi la concurrence du sucre de betterave.

Les habitations sucrières se concentrent autour de la première usine créée en 1844. Avec l'utilisation de la vapeur, la demande de canne augmente. Les planteurs sont obligés d'emprunter pour développer la production de canne. Un système bancaire d'émission des billets, de crédit agricole et de change est alors mis en place.

En 1848, l'abolition de l'esclavage force le passage d'un système esclavagiste à un système salarié. Avec la concurrence du sucre de betterave, et le système salarié, les planteurs ne

peuvent plus faire face à leur emprunt bancaire. L'usine, en rachetant leur terre, devient peu à peu un gros propriétaire terrien.

La Guadeloupe connaît une période de croissance de 1860 à 1880, suivie une crise de surproduction de 1882 à 1886 : le prix du sucre s'effondre. C'est à la fin du siècle que le rhum des colonies connaît son âge d'or.

Aujourd'hui il ne reste que deux usines sucrières, l'usine de Gardel en Grande-Terre et l'usine de Grand-Bourg à Marie-Galante. La Guadeloupe compte sept distilleries en Guadeloupe continentale et quatre distilleries à Marie-Galante. La production de rhum se partage entre le rhum agricole (23 920 hectolitres d'alcool pur en 2000) obtenu par distillation du jus de canne fermenté, le rhum industriel préparé à partir de mélasse (42 460 HAP) et le rhum léger (11 460 HAP).

Les difficultés que rencontre la filière sucre ne viennent pas principalement de l'industrie, mais de la culture de la canne. Cette dernière n'est pas suffisamment rentable, car les coûts de production sont trop élevés par rapport au marché mondial. De plus, la production de canne est insuffisante pour rentabiliser les deux usines sucrières et les neuf distilleries du territoire.

2-3-2-La Martinique, la canne à sucre et le rhum

Depuis l'installation des français en Martinique en 1635, les principales cultures d'exportation sont le café et le coton. La canne à sucre est introduite sur l'île en 1650. La Martinique exporte alors un peu de sucre, mais la production est peu rentable car seule une faible proportion de jus est transformée en sucre. La solution à ce gaspillage est apportée par un ouvrier de la plantation qui goûta au jus que la chaleur et les levures naturelles avaient fait fermenter : c'est le début du rhum de sucrerie ou rhum industriel.

En 1694, le père Labat fonde des habitations sucrières dans les paroisses où il est affecté. Il invente un appareil à distiller révolutionnaire, l'alambic. De nombreuses sucreries s'adjoignent alors une distillerie. En 1767, la Martinique compte 450 sucreries. En 1870, la canne couvre 57% de la surface cultivée ; les sucreries traditionnelles se regroupent en usines centrales comme en Guadeloupe. L'usine du Galion est créée en 1861 et constitue un domaine agricole après le rachat de toutes les habitations autour du Grand-Fonds – Galion.

Tout comme en Guadeloupe, la surproduction à l'échelle mondiale due à l'autorisation de fabriquer du sucre de betterave engendre une crise du sucre sans précédent dès 1896. Face à cet effondrement du cours du sucre, d'autres débouchés sont envisagés : apparaît alors l'idée de distiller du jus de canne frais fermenté. C'est l'arrivée du Rhum Agricole ou Rhum Habitant. Pour faire face à la demande, une véritable industrie rhumière se met en place. L'usine du Galion résiste à la crise en diminuant le coût de production de la canne et en apportant des modifications foncières.

Le 8 Mai 1902, l'éruption de la Montagne Pelée diminue de moitié la capacité de production de l'industrie rhumière de l'île. La crise sucrière dure jusqu'en 1905. C'est lors de la première guerre mondiale que la demande en rhum est relancée. Les distillateurs métropolitains s'inquiètent de ce concurrent aux cours trop bas et trop anarchiques. La métropole limite alors l'importation des rhums coloniaux avec la loi du contingentement du 31 décembre 1922.

Depuis 1982, l'usine du Galion est la dernière usine en activité, seule restante des treize usines que possédait la Martinique en 1960. Sept distilleries agricoles sont encore en activité.

En 1996, Le rhum agricole de la Martinique a obtenu une "AOC Martinique". Ce département d'outre-mer, premier producteur européen de rhum agricole est actuellement le seul à obtenir une AOC pour son rhum agricole. Un syndicat de Défense de l'appellation d'origine "rhum agricole Martinique" gère le dispositif AOC.

3-INTRODUCTION A LA MALADIE DE LA FEUILLE JAUNE

La maladie de la feuille jaune est causée par le *Sugarcane Yellow Leaf Virus* (SCYLV) et peut être transmise par plusieurs espèces de pucerons vecteurs, *Melanaphis sacchari*, *Rhopalosiphum maidis*, *R. rufiabdominalis* et *Ceratovacuna lanigera* (Zhou et al., 2006; Schenck and Lehrer, 2000).

3-1-Physiologie et symptômes de la maladie

Les premiers symptômes sont observés en 1988 à Hamakua à Hawaii sur le cultivar H65-7052 (Schenk *et al.*, 1997). Des chutes du rendement sur un autre cultivar présentant les mêmes symptômes sont constatées au Brésil en 1990 (Vega *et al.*, 1997). Il s'agit de jaunissement de la nervure centrale sur la face inférieure des feuilles de canne. La coloration peut également être rose (Figure 8).



Figure 8 : Photo de feuilles de canne à sucre exhibant des symptômes de la maladie des feuilles jaunes.

Ces symptômes peuvent également apparaître à la suite d'un manque d'irrigation créant un stress hydrique chez la plante, l'approche de la maturité, un déficit ou un excès en nutriments, etc. (Comstock *et al.*, 1994; Schenck, 2001). Dans tous les cas, cette décoloration apparaît à la suite d'un stress de diverses origines chez la plante. Les symptômes n'apparaissent pas systématiquement au début de l'infestation.

3-2-Agent causal de la maladie

Le *Sugarcane Yellow Leaf virus* (SCYLV) est un *Polerovirus* de la famille des *Luteoviridae* (D'arcy and Domier, 2005). Les *Luteoviridae* comptent 19 virus classés en trois genres : les *Luteovirus*, les *Polerovirus* et les *Enamovirus*.

Le SCYLV est un virus à ARN simple brin, à un seul constituant de polarité positive et à symétrie icosaédrale. Le génome est composé de 5 898 nucléotides avec une masse moléculaire d'environ 2.10^6 daltons (Moonan *et al.*, 2000). Les particules virales (Figure 9)

ont un diamètre de 24 à 28 nm, et sont localisées dans les cellules compagnes des vaisseaux libéro-ligneux (Schenck *et al.*, 1997 ; Vega *et al.*, 1997).

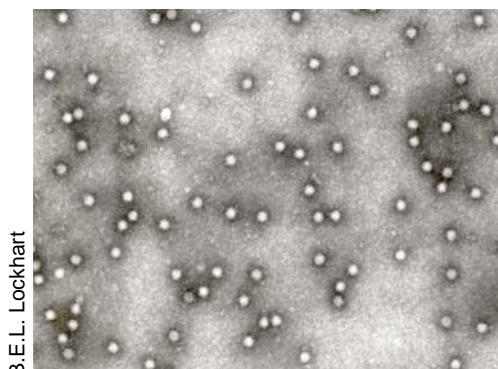


Figure 9 : Photo des particules virales du *Sugarcane Yellow Leaf Virus* en microscopie électronique.

Les *Luteoviridae* sont les phytovirus qui causent les plus grandes pertes économiques. Ces virus s'attaquent à beaucoup d'espèces à grand intérêt économique. Les plus connues sont le concombre, la betterave, la pomme de terre, l'orge et la canne à sucre. D'une manière générale les pertes de rendement varient en fonction des espèces, et selon la physiologie de la plante hôte. (Rassaby L., 2001).

3-2-1-Diversité génétique du SCYLV

Grâce à l'évolution des méthodes de diagnostic viral par sérologie ou biologie moléculaire, le SCYLV a été recensé dans le monde entier dans la plupart des pays producteurs de canne à sucre. La répartition géographique du SCYLV a conduit plusieurs groupes de recherche à étudier sa diversité génétique. Moonan et Mirkov (2002) ont identifié deux groupes de pathogènes parmi les isolats de virus prélevés en Amérique du Nord, du Sud et du Centre. Un groupe contenait uniquement les isolats provenant de Colombie (C-population) et le second groupe (superpopulation) a été constitué avec les isolats provenant des autres pays (Argentine, Brésil, Guatemala, USA/Floride-Louisiane-Texas). Borg *et al* (2001) ont montré que réaliser l'empreinte génétique de la séquence virologique à partir de différents cultivars infectés par le SCYLV, révélait la diversité des séquences du SCYLV à la fois entre zones géographiques ou à l'intérieur même d'une zone géographique.

A partir de séquences tirées du génome entièrement séquencé du SCYLV, Abu Ahmad *et al.* (2006a) ont décrit trois génotypes (BRA, PER et REU) trouvés dans 246 échantillons de feuille provenant de 18 pays du monde entier. Le nom donné à chacun de ces génotypes est fonction de la zone géographique où ils ont été détectés pour la première fois : respectivement au Brésil, au Pérou et à la Réunion. De plus, un isolat de virus provenant de Cuba a été partiellement séquencé. Ce dernier montre seulement 77 à 80% d'analogie avec les trois autres génotypes dans la séquence peptidique de l'ORF1. Ceci suggère que l'isolat cubain est un autre génotype (génotype CUB) ou même un isolat d'une nouvelle espèce virale (Abu Ahmad *et al.*, 2006a).

Des amorces spécifiques pour RT-PCR ont été dessinées dans le but d'analyser la distribution et l'impact des génotypes BRA, CUB, PER et REU dans différentes régions du monde. Cependant, les génotypes BRA et PER étant très proches phylogénétiquement, ils ne peuvent être différenciés (Abu Ahmad *et al.*, 2006b). Ces deux génotypes ont par conséquent été associés et nommés génotype BRA-PER. Dans une étude incluant 18 régions du monde entier, seul un génotype du SCYLV est présent dans la plupart des zones de production de canne à sucre. Le génotype BRA-PER était le plus répandu et a été trouvé dans toutes les régions, alors que les génotypes CUB et REU ont été trouvés chacun dans seulement quatre régions. Plusieurs génotypes du SCYLV ont été trouvés dans des régions telles que le Brésil, la Colombie, la Guadeloupe, l'île Maurice et l'île de la Réunion. Ceci suggère différentes introductions de virus et/ou des évolutions divergentes des virus après leur introduction dans un nouvel environnement (Abu Ahmad *et al.*, 2006b).

3-2-2-Variation de pathogénicité du SCYLV

Abu Ahmad *et al.* (2007a) ont étudié la virulence des différents génotypes du SCYLV. Les différents génotypes du SCYLV ont été inoculés à huit cultivars multipliés *in vitro*, différant dans leur résistance à l'infection par le SCYLV ou à la maladie des feuilles jaunes. L'inoculation a été réalisée par l'intermédiaire de l'espèce *M. sacchari* en Guadeloupe et à la Réunion. Les plants inoculés ont été transférés à Montpellier et ont grandi dans une serre afin d'analyser l'efficacité de transmission dans un environnement où le vecteur est absent. L'analyse de l'impact des différents génotypes du SCYLV et le nombre de plants présentant des symptômes ont montré l'existence de différences d'agressivité et de virulence parmi les isolats de cette espèce virale. Les génotypes BRA-PER et CUB ont pu être transmis à l'ensemble des 8 cultivars mais le génotype REU n'a jamais pu être transmis aux cultivars

résistants. Le génotype REU a été transmis avec succès au cultivar R570 en Guadeloupe, mais pas à la Réunion. Les génotypes BRA-PER et CUB induisent des symptômes de jaunissement de feuille chez les cultivars sensibles ou très sensibles, tandis que le génotype REU induit des symptômes chez peu de plantes.

Récemment, la croissance de plants infectés par le SCYLV des cultivars R570 et SP71-6163, chacun importé de différents pays, a été comparée en serre à Montpellier (Abu Ahmad *et al.*, 2007b). La gravité des symptômes chez les plants du cultivar SP71-6163 variait en fonction de leurs origines, ce qui conforte l'hypothèse de variation de virulence parmi les isolats du virus. Néanmoins, ces dernières différences n'ont pu être reproduites lors des répétitions d'essais, ce qui suggère des comportements différents de la plante sous des conditions environnementales variées.

3-3-Le vecteur du SCYLV

Durant cette étude et durant les études précédentes, *M. sacchari* est le seul vecteur du SCYLV observé sur canne à sucre aux Antilles. Par conséquent, nous nous intéresserons uniquement à cette espèce de vecteur.

3-3-1-Systématique

M. sacchari est un membre de la famille des *Aphididae*, de la sous-famille des *Aphidinae*, de la tribu des *Aphidini* et du genre *Melanaphis* (Remaudière, 1997). Selon Remaudière (1997), plusieurs autres noms d'espèce lui ont déjà été attribués : *pheidolei* Théobald, 1916, *sorghella* Schouteden, 1906, *sorghii* Theobald, 1904.

3-3-2-Caractères morphologiques

M. sacchari est un puceron de couleur crème à jaunâtre de un à deux millimètres de long. Il existe sous forme d'aptère ou d'ailé (Figure 10). Ces deux formes présentent des caractéristiques communes. Le sinus frontal est profondément sinué avec un tubercule frontal médian distinct. Les cornicules sont pigmentées, contrairement à la cauda qui est digitiforme (Remaudière, 1997).

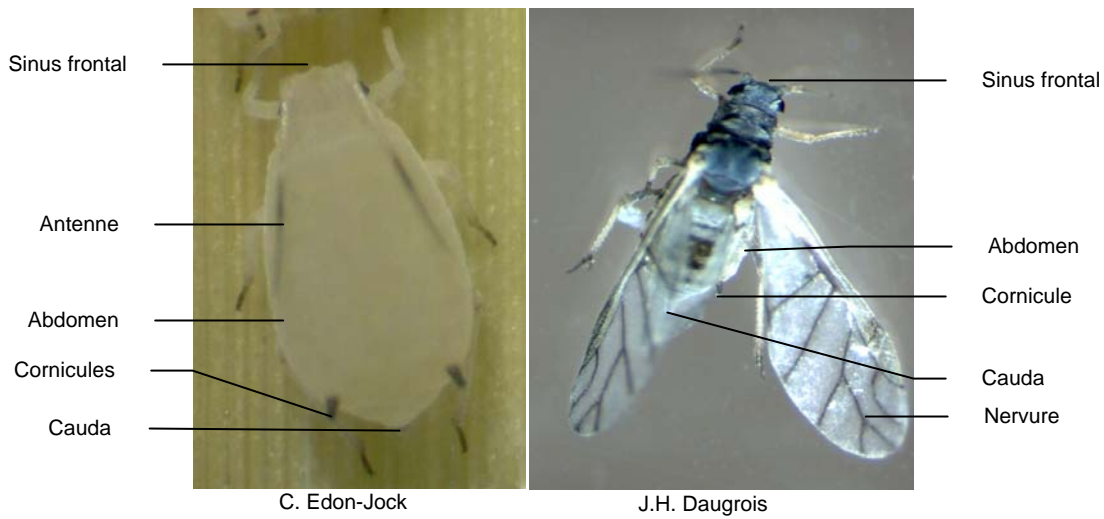


Figure 10. Photo de la forme aptère (à gauche) et de la forme ailée (à droite) de *Melanaphis sacchari*.

La nervure des ailes antérieures est bien marquée, avec à leur extrémité une petite zone triangulaire pigmentée et floue. La nervation est complète, avec la médiane bifurquée deux fois. L'abdomen de la forme ailée présente des bandes transversales sombres et des sclérites marginaux. Les cornicules sont droites.

L'abdomen de la forme aptère est dépourvu de bandes transversales. La pigmentation apparaît chez les formes plus âgées, cependant, elle n'est pas obligatoire (Figure 11).



Figure 11. Photo d'une colonie de *Melanaphis sacchari* sur feuille de canne à sucre. L'adulte à la pigmentation foncée est en fin de vie. A sa droite, une larve d'aillée, dont les ptérotèques sont visibles.

3-3-3-Cycle de développement

En région tropicale, comme la quasi-totalité des espèces d'Aphides, *M. sacchari* a un comportement anholocyclique et se multiplie parthénogénétiquement sur son hôte tout le long de l'année : les femelles ailées en s'installant sur une plante donnent naissance directement à des larves femelles. Celles-ci au terme de trois mues larvaires et d'une mue imaginale, deviennent des adultes aptères fécondes qui assurent la colonisation de la plante. Lorsqu'il y a surpopulation, dépérissement ou vieillissement de la plante hôte, des femelles ailées apparaissent au sein des colonies, permettant ainsi la dissémination des pucerons vers de nouvelles plantes hôtes. D'autres facteurs, comme la baisse de température, peuvent favoriser la formation d'ailés (Autrique A., Ntahimpera L., 1994).

3-3-4-Dégâts causés aux plantes hôtes

Les pucerons, insectes piqueurs suceurs, se nourrissent en prélevant et en absorbant la sève de leur hôte. Il s'ensuit lors de fortes infestations, un affaiblissement de la plante qui végète, éventuellement se flétrit et meurt. L'action irritative des piqûres et parfois toxique de la salive peut aussi provoquer la déformation des feuilles infestées. Ces dernières s'enroulent, se crispent, et bien souvent jaunissent (Autrique A., Ntahimpera L., 1994).

Un liquide poisseux, luisant, riche en sucre est excrété par les pucerons : le miellat. Il recouvre souvent les parties aériennes des plantes fortement infestées. Très apprécié des fourmis, il constitue un milieu riche et donc favorable au développement de champignons saprophytes (*Capnodium* sp et *Fumago sacchari*) qui noircissent. Cette pellicule noire créée par les spores de ces champignons est appelé fumagine, elle gêne les fonctions respiratoires et chlorophylliennes de la plante ou souillent les produits de récolte (Autrique A., Ntahimpera L., 1994).

3-4-Aspect de la transmission du SCYLV

Le SCYLV peut être disséminé lors de la plantation de boutures obtenues à partir de cannes infectées (Schenck, 2001), mais également par l'intermédiaire d'insectes vecteurs (Zhou *et al.*, 2006; Schenck and Lehrer, 2000). Les virus de cette famille ne peuvent être transmis ni

mécaniquement, ni par l'intermédiaire de la reproduction. Ils sont transmis essentiellement par des pucerons selon le mode circulant persistant et non multipliant. Les particules virales sont ingérées avec la sève lors de la prise de nourriture sur une plante infectée (Figure 12). Elles circulent dans le corps du puceron du tube digestif à la salive de l'insecte (Gray and Gildow, 2003).

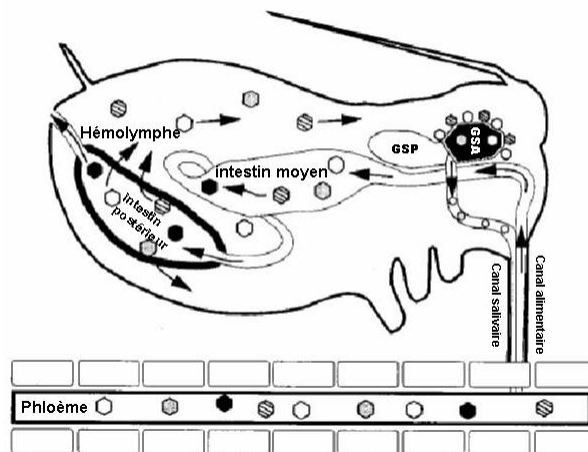


Figure 12 . Acquisition d'un virus circulant de la Famille des *Luteoviridae* lors d'une piqûre d'alimentation dans le phloème d'une plante infectée (d'après Gray and Gildow, 2003).

GSA : glandes salivaires accessoires ; GSP : glandes salivaires principales.

Les espèces *C. lanigera* et *M. sacchari*, sont connues comme étant les principaux vecteurs du SCYLV (Zhou *et al.*, 2006; Schenck and Lehrer, 2000).

Les phytovirus appartenant aux *Luteoviridae* présentent une structure simple mais une biologie complexe. Les virus diffèrent génétiquement, mais présentent une biologie similaire, particulièrement en ce qui concerne la transmission par les aphides. L'exemple des *Luteovirus* est pris pour la suite, cependant, le mode de transmission est le même pour tous les genres de cette famille (Gray and Gildow, 2003).

Le système salivaire du puceron est constitué d'un jeu de deux glandes salivaires accessoires et principales communicant entre elles. Elles sont situées de chaque côté de la tête immédiatement après les lobes optiques du cerveau. Le jeu de glandes salivaires accessoires et principales sont connectées par des conduits salivaires qui forment un conduit salivaire commun conduisant à la « seringue salivaire », une structure spéciale destinée à injecter les sécrétions salivaires à l'intérieur des plantes durant la prise de nourriture (Figure 12).

La transmission peut-être séparée en quatre étapes :

- L'ingestion du virus de la plante hôte à travers le canal alimentaire du puceron
- L'acquisition du virus
- La persistance du virus dans les tissus et l'hémolymphe
- Le passage des particules virales des glandes salivaires au phloème de la plante hôte.

L'ingestion commence quand le puceron parvient à aspirer la sève élaborée du phloème ou des cellules compagnes d'un hôte infecté, en utilisant ses stylets. Les parties buccales du puceron destinées à la pique-succion consistent en une extension des maxillaires et des mandibules qui se trouvent dans le tube labial. Les stylets pénètrent les tissus intercellulaires de la plante à travers la lamelle médiane séparant les cellules de l'épiderme et le mésophylle. Quand les stylets atteignent le phloème, ils traversent la membrane cellulaire, pénètrent le cytoplasme des cellules du phloème et l'ingestion commence. Le puceron pénètre la feuille de la plante et commence à se nourrir en 15 à 30 minutes approximativement. Une fois le phloème pénétré, l'ingestion du virus dure environ une à cinq minutes. L'ingestion de phytovirus localisés dans les cellules du phloème n'est pas spécifique, beaucoup de virus qui ne sont pas transmis par les pucerons peuvent être ingérés à travers l'intestin et sont évacués par le miellat (Figure 12).

L'acquisition a lieu quand le virus est reconnu spécifiquement et transporté à travers la membrane des cellules épithéliales de l'intestin de l'insecte et est libéré dans l'hémolymphe. Environ 12 à 16 heures sont nécessaires aux luteovirus pour être transportés activement à travers les cellules épithéliales de l'intestin et libérés dans l'hémolymphe de l'insecte. La capacité des aphides à acquérir différents luteovirus à travers l'intestin et l'hémolymphe est spécifique du virus. Le degré de spécificité n'est cependant pas aussi élevé pour les autres étapes de la transmission.

Les particules virales sont libérées dans l'hémolymphe où elles peuvent survivre (Figure 12). Les mécanismes de survie et de mouvement dans l'hémolymphe spécifiques aux luteovirus ne sont pas encore connus. Les particules virales y survivent plusieurs semaines et sont apparemment transportées passivement aux glandes salivaires où la transmission circulante s'achève.

La transmission a lieu au moment où les particules virales passent des glandes salivaires au canal salivaire qui prolonge les stylets (Figure 12). Pendant la pénétration des tissus et la prise de nourriture, les enzymes salivaires et d'autres excréments sont injectées à l'intérieur

de la plante à travers un petit canal situé à l'intérieur du stylet. Les luteovirus se trouvant dans les sécrétions salivaires sont inoculés par ce biais aux cellules de l'hôte potentiel. Seul les luteovirus capables de pénétrer les glandes salivaires et le canal salivaire sont donc transmissibles. Les luteovirus peuvent être transmis en 30 minutes par un puceron tentant de prélever du phloème. L'efficacité maximale de transmission nécessite plusieurs heures de nutrition.

La période de latence est le temps qui s'écoule entre l'ingestion du virus et le moment où le puceron est capable de transmettre le virus. Cette période comprend l'acquisition dans l'hémolymphe, le mouvement vers les glandes salivaires accessoires et le transport à l'intérieur du canal salivaire. En général, la période minimale de latence pour une transmission efficace est d'au moins 24 heures et peut s'étendre jusqu'à trois ou quatre jours. Durant cette période, le puceron est incapable de transmettre le virus même si il s'est nourri sur une plante infectée et a acquis le virus. La période de latence est influencée par plusieurs facteurs génétiques et environnementaux, incluant l'efficacité de transmission de chaque population d'aphides pour un isolat viral spécifique, la concentration du virus dans les tissus de la plante ou encore la température.

Il est admis que les *luteovirus* ne se multiplient pas à l'intérieur de leur vecteur. La spécificité du vecteur est liée à l'isolat de virus et non à des différences entre populations de vecteurs. La transmission par une espèce de puceron donnée est corrélée à la structure de la protéine de la capsid d'un virus donné. Les aphides transmettent les particules uniquement en fonction du type de la protéine de la capsid, quelque soit l'ARN présent dans la particule. La spécificité est déterminée par des interactions entre les protéines de la capsid et les membranes des glandes salivaires du puceron. Les virus sont associés à la lamelle basale des glandes salivaires accessoires. Elles sont un lieu de régulation de la spécificité du vecteur. La protéine de la capsid du virus reconnaît des récepteurs spécifiques situés sur les glandes salivaires accessoires du vecteur.

Les facteurs environnementaux influencent l'efficacité des interactions virus-vecteur, mais ne déterminent pas ces interactions.

3-5-Contrôle de la maladie

La maladie de la feuille jaune résulte d'une interaction entre la plante, le vecteur et le virus. Il y a donc deux cibles potentielles vers lesquelles orienter la lutte.

La lutte directe contre le virus est impossible. En effet, contrairement à certaines bactéries, le SCYLV ne peut être éliminé par thermothérapie (Chatenet *et al.*, 2001 ; Cronjé *et al.*, 1998). De ce fait, des boutures saines ne peuvent être obtenues à partir de tiges contaminées par le SCYLV. En revanche, il est possible d'éliminer le virus par culture de méristèmes (Chatenet *et al.*, 2001). Les plants assainis peuvent être multipliés à l'abri des prédateurs par culture *in vitro*, en revanche, ce matériel qui est sain à la plantation peut être rapidement contaminé au champ par le puceron vecteur.

Orienter la lutte contre le puceron est la méthode la plus ancienne employée par les agriculteurs. Cependant, la lutte chimique montre ses limites dans le cas des épidémies virales. En effet, l'utilisation d'aphicide ne permet pas de limiter les premières infections, il n'est pas forcément suffisamment foudroyant pour éliminer le vecteur avant qu'il ne transmette le virus lors de sa prochaine piqûre. L'efficacité de ces produits est généralement de 10 à 15 jours. Il faut donc des traitements réguliers. Les traitements ne peuvent être réalisés que durant les tous premiers mois de croissance, car la croissance et le tallage des tiges rendent de plus en plus difficile l'accès à la parcelle. Cette méthode est donc coûteuse d'un point de vue financier mais également d'un point de vue écologique.

A long terme, l'utilisation des variétés résistantes est la meilleure solution. Des différences variétales marquées ont été mises en évidence : certains cultivars présentent de forts taux d'infection par le SCYLV, comme CP72-1210 en Floride et H65-7052 à Hawaii (Comstock *et al.*, 1998) , et d'autres paraissent résistantes car aucun virus n'y a jamais été détecté alors qu'ils étaient cultivés à proximité d'autres variétés présentant de forts taux d'infection. C'est le cas de M1176/77 à île Maurice, CP57-603 et CP89-1509 en Floride (Comstock *et al.*, 1998 ; Rassaby L., 2001).

La résistance de la variété peut s'exprimer envers le virus et/ou le vecteur. La limite entre les deux n'est pas évidente. En effet, le SCYLV étant uniquement transmis par le puceron, l'absence de l'agent causal suggère deux hypothèses. Premièrement, le vecteur transmet le virus mais la plante résiste à l'infection, elle exprime donc une résistance au virus et non au vecteur. Deuxièmement, la plante peut présenter différents comportements envers les insectes piqueurs suceurs du type :

- « barrière physique » : la constitution de la plante peut opposer des barrières mécaniques ou chimiques qui empêchent la piqûre,
- « action chimique » : une fois ingérée, la sève est plus ou moins indigeste voire même toxique,

Une autre méthode pour contrôler la maladie de la feuille jaune est de connaître les facteurs favorisant sa dissémination, ce qui permettrait d'identifier les facteurs limitant cette dernière.

4-QUESTION DE RECHERCHE

La filière canne sucre rhum est un enjeu économiquement important pour la Guadeloupe et la Martinique. En effet, cette filière se place en tête des activités agricoles des deux îles. Bien que la production de sucre soit plus importante dans la filière en Guadeloupe et inversement la production de rhum en Martinique, elles dépendent toutes deux d'une production cannière compétitive. Pour cela, il faut limiter les risques d'épidémie. La maladie de la feuille jaune est la dernière maladie identifiée sur la canne à sucre. Elle n'a pas encore été intégrée au programme d'amélioration et de sélection variétale. En effet avant d'intégrer cette maladie à ce programme il faut répondre à un certain nombre de questions fondamentales pour la compréhension du phénomène.

Quel est l'impact du cultivar sur les populations de vecteur et sur l'infection? Et inversement, quel est l'impact de l'infection sur les cultivars ? Quel est le rôle de l'environnement dans l'épidémiologie ? Quel est l'impact de la diversité et de la pathogénicité du virus? Quelle est l'implication de la diversité du vecteur? Peut-on construire ou identifier des outils de prédiction de la dissémination?

5-OBJECTIFS DE L'ETUDE

En fonction des questions de recherche énumérées plus haut, des moyens dont nous disposons en temps et en matériel, nous avons défini deux grands objectifs. Premièrement, analyser la dissémination du SCYLV en nous intéressant particulièrement à l'influence du cultivar de canne à sucre, de l'environnement, du génotype viral, de l'insecte vecteur. Deuxièmement, caractériser la transmission du SCYLV par son vecteur au sein d'une parcelle saine à la plantation.

PARTIE 2/ CARACTERISATION DE LA DISSEMINATION DU SCYLV DANS LES ZONES DE PRODUCTION DE GUADELOUPE ET MARTINIQUE

1-INTRODUCTION

1-1-ORGANISATION DE LA FILIERE CANNE-SUCRE-RHUM

La filière canne sucre rhum joue un rôle prépondérant dans l'activité économique de la Guadeloupe et de la Martinique.

Les principaux intervenants de la filière sont :

- La commission paritaire de la canne et du sucre (CPCS), composée de planteurs et d'industriels, elle intervient dans chaque DOM sur les aspects techniques et économiques.
- Le centre technique de la canne et du sucre (CTCS) est chargé notamment d'effectuer des mesures concernant la teneur en sucre des cannes livrées aux usines.
- Les organisations professionnelles représentent les producteurs dans chaque département. A la Martinique, le syndicat de défense de l'Appellation d'Origine Contrôlée Rhum Agricole a été créé.
- Le conseil de l'interprofession des rhums traditionnels des départements d'outre-mer (CIRT-DOM) constitue un instrument de régulation et de valorisation de ces rhums sur le marché. Il regroupe l'ensemble des syndicats de la filière de chaque département.
- Le comité canne-sucre-rhum de l'Office de développement de l'économie agricole des départements d'outre-mer (ODEADOM) associe professionnels et administration pour discuter des principales questions intéressant la filière.

1-1-1-Organisation de la filière en Guadeloupe

En Guadeloupe, l'organisation professionnelle de la filière canne est différente des autres départements. La chambre d'agriculture a pour mission d'organiser la filière et de fournir des prestations de conseil aux différents intervenants. Le CTCS est l'organe fédérateur de la filière, il fournit des boutures à certains exploitants agricoles appelés pépiniéristes. Les autres exploitants s'approvisionnent chez ses derniers. Le Centre International pour la Recherche Agronomique et le Développement (CIRAD) assure la recherche scientifique sur la canne, la sélection variétale et la production des *vitro* plants pour les pépinières mères du CTCS.

Les deux tiers des exploitations comptent moins de deux hectares. La plupart des services en réforme foncière des exploitants sont assurés par la Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural (SAFER).

Quatre Sociétés d'Intérêt Collectif Agricole, ou SICA, sont chargées de l'encadrement technique des exploitants, de leur approvisionnement en intrants (engrais, herbicides, produits phytosanitaires), de la redistribution des aides publiques qui leur sont allouées, du suivi et de la mise à jour du fichier des exploitants géré par la Direction de l'Agriculture et de la Forêt (DAF). Ces SICA occupent l'ensemble des bassins canniers de Guadeloupe. La SICAGRA gère les exploitants du sud de la Grande-Terre, la SICADEG ceux du nord de la Grande-Terre, l'UDCAG ceux du nord de la Basse-Terre, et la SICAMA ceux de Marie-Galante.

Il existe également onze Coopératives d'Utilisation du Matériel Agricole ou CUMA dont deux se situent à Marie-Galante. Les CUMA réalisent les travaux de coupe mécanique, de chargement et de transfert. Ces travaux sont également assurés par les Entreprises de Travaux Agricole (ETA), ce sont des sociétés de droit privé, la plupart sont des SARL. (http://www.guadeloupe-informations.com/article.php?id_article=78)

Les pré-pépinières (pépinières secondaires) gérées par le CTCS sont plantées avec des boutures issues de cannes vierges des pépinières mères (pépinières primaires). Les boutures issues des pré-pépinières serviront à planter les pépinières commerciales (tertiaires). Les pépinières commerciales sont généralement situées à proximité des parcelles qu'elles serviront à planter l'année suivante. La sole cannière de Guadeloupe est replantée en moyenne tous les six ans. Pour une plantation industrielle de 2000 hectares par an, il faut environ 200 hectares de pépinières commerciales, 20 hectares de pré-pépinières et 2 hectares de pépinières mères.

1-1-2- Organisation de la filière en Martinique

La filière est constituée de très gros planteurs qui produisent un gros volume et environ 250 petits planteurs organisés autour de chefs de file qui leur fournissent le matériel de récolte dont ils ne disposent pas.

Cette filière dispose également de l'appui du CTCS qui assure quatre fonctions principales : la recherche appliquée en matière de production de canne à sucre, l'assistance technique à

la production, l'appui au contrôle de paiement des planteurs à travers son laboratoire, la formation appuyée sur ses capacités d'expertise ainsi que le contrôle de la qualité des rhums pour l'AOC et le conseil en fermentation. C'est l'organisme principal intervenant dans la filière.

Deux autres organisations sont impliquées dans l'accompagnement des producteurs de canne à sucre : l'association professionnelle Canne Union et la CUMA Malgré Tout. Un bassin de production particulier est organisé autour de l'usine du Galion, gérée par une société d'économie mixte, au sein duquel intervient une CUMA qui a pour mission d'accompagner la production et de fournir les matériels nécessaires à la récolte. (<http://www.vivea.fr/sites/internet/pages/Documents/PDFT/EtudeMartinique.pdf>).

La canne à sucre est cultivée dans des zones relativement contrastées du point de vue agronomique et pédoclimatique. Les communes du Lamentin, Rivière-Salée, François, Robert et Trinité restent les principaux lieux de production de cannes destinées à l'usine du Galion. Parallèlement, la majorité des distilleries agricoles ont des exploitations importantes (Carbet, Saint-Pierre, Macouba, Basse-Pointe, Sainte-Marie, François, Rivière-Pilote, Sainte-Luce).

1-2-REPARTITION DES CULTIVARS DANS LES BASSINS CANNIERS

1-2-1-Répartition des cultivars en Guadeloupe

1-2-1-1-Les bassins canniers de Guadeloupe

La Guadeloupe est constituée de quatre grands bassins canniers (Figure 13) :

- Nord Grande-Terre : constitué des communes d'Anse-Bertrand, Port-Louis, Petit-Canal
- Sud/Centre Grande-Terre : Abymes, Morne-A-L'eau, Moule, Saint-François, Sainte-Anne
- Basse-Terre : Sainte-Rose, Lamentin, Petit-Bourg, Capesterre
- Marie-Galante

Ce découpage est géographique mais aussi hérité de l'organisation économique mise en place lors de la restructuration industrielle en 1980.

Il existe des zones particulières qui méritent d'être citées. Le bassin des Abymes, que l'on rattache au Sud Grande-Terre, possède des caractéristiques qui lui sont propres notamment au niveau de ses sols hétérogènes allant du ferrallitique au vertisol. La zone de Capesterre

dont le développement de rotations de culture canne/banane permet une amélioration de la qualité des sols (Manuel technique de la canne à sucre, CTICS).

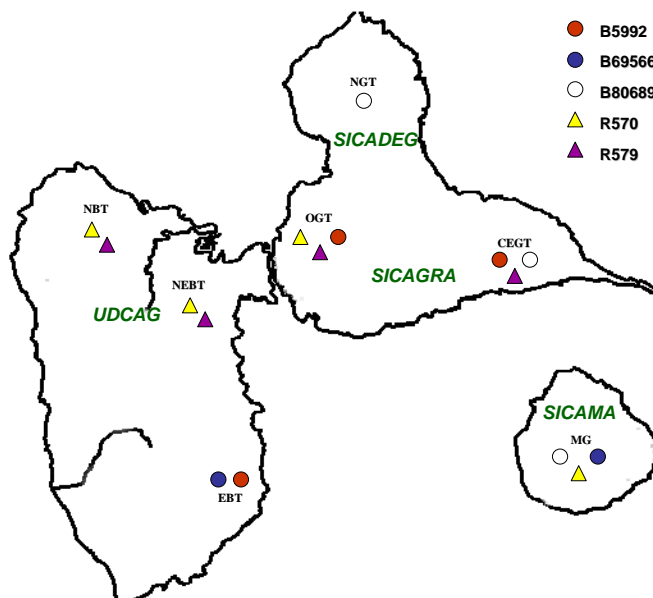


Figure 13. Répartition des cultivars de canne à sucre sur les différents bassins canniers de Guadeloupe et Sociétés d'intérêt Collectif Associées.

Nord Basse Terre (NBT), Est Basse Terre (EBT), Nord Est Basse Terre (NEBT), Nord Grande Terre (NGT), Ouest Grande Terre (OGT), Centre Est Grande Terre (CEGT) et Marie-Galante (MG).

1-2-1-2-Les cultivars de canne à sucre de Guadeloupe et leur répartition :

Les cultivars les plus plantés sont B80689 avec environ 50% des plantations en 2006-2007, R579 plus de 22%, R570 près de 10%, et B69566 8%. B5992 est en perte de terrain depuis quelques années.

En fonction des besoins en eau et minéraux du sol, certains cultivars sont mieux adaptés à certaines zones que d'autres (Figure 13).

- B5992, la « canne à piquant », s'adapte bien aux bons sols de la zone du centre de Grande-Terre (Abymes, Morne à l'eau, Petit-Canal) ou à certaines zones littorales du Nord Basse-Terre.
- B69566, la « canne bleue », est bien adaptée aux zones humides du Nord Basse-Terre et aux vertisols profonds de la Grande-Terre et de Marie-Galante.

- B80689, « matos » ou « canne blanche », est adaptée aux sols lourds et au climat de la Grande-Terre et Marie-Galante.
- R570, la « canne jaune » ou encore « R », s'accommode aussi bien des sols ferrallitiques de la Basse-Terre que des vertisols de Grande Terre et Marie-Galante. Elle est présente sur l'ensemble des zones de culture de Guadeloupe et Marie-Galante.
- R579 est bien adaptée aux zones humides de la Basse-Terre (manuel technique de la canne à sucre, CTICS).

1-2-2- Répartition des cultivars en Martinique

1-2-2-1-Les bassins canniers de Martinique

On distingue trois grandes zones de culture de la canne (Figure 14) :

- Au Nord : les communes de Saint-Pierre et la Trinité
- Au Centre : les plaines du Lamentin
- Au Sud : les communes de Rivière Pilote et Sainte-Luce

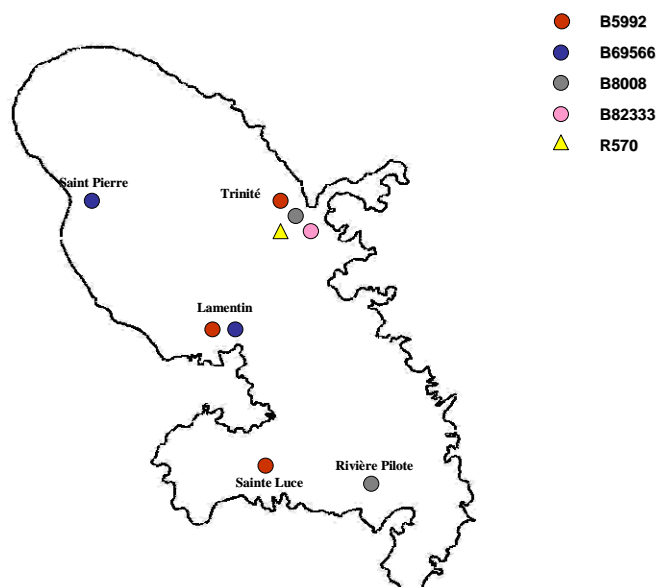


Figure 14. Répartition des cultivars de canne à sucre sur les différents bassins canniers de Martinique.

1-2-2-2-Répartition des principaux cultivars de canne à sucre en Martinique

De même qu'en Guadeloupe, certains cultivars sont mieux adaptés à certaines zones de cultures (Figure 14).

- B5992, « la canne roseau », s'adapte particulièrement bien aux sols du centre et du sud, qui présentent une bonne rétention en eau.
- B69566, « la canne bleue », est bien adaptée à une bonne pluviométrie et une bonne réserve en eau du sol, et aux vertisols profonds. Elle est actuellement présente sur les sols du nord du centre et du sud de l'île.
- B8008, « la canne zikak », est bien adaptée aux différents terroirs de l'île, elle est actuellement développée sur toute la sole cannière.
- B82333, « la canne cannelle », est résistante à l'hydromorphie et se répartit dans les bassins du nord et du sud.
- R570, « la canne paille », est adaptée aux sols à faible réserve en eau (manuel technique de la canne à sucre, CTCS Martinique).

Rapport-Gratuit.com

2-ETUDE DE LA REPARTITION DU SCYLV AUX ANTILES FRANCAISES

Les études réalisées par le passé en Guadeloupe par le CIRAD et en Martinique par le CTCS avec l'appui du CIRAD, ont révélé que le SCYLV et son vecteur *M. sacchari* sont bien présents aux Antilles. Cependant, ces études ne nous permettent pas de déterminer l'impact du SCYLV sur la filière canne à sucre des deux îles.

L'objectif est de réaliser une étude préliminaire afin de déterminer dans quels cultivars et dans quelles zones géographiques le virus est présent, afin de vérifier si le caractère génétique du cultivar et l'environnement jouent un rôle dans la contamination par le SCYLV. De même, bien que des études de préférence du vecteur pour certaines variétés ont été menées en serre en 2004, il faut également vérifier que le vecteur est présent sur tous les cultivars et dans toutes les zones géographiques des deux îles sœurs.

Sachant également qu'il existe trois génotypes du SCYLV identifiables, et que des études ont révélé que ces trois génotypes sont présents sur la station de Roujol en Guadeloupe, l'objectif est de déterminer quels génotypes du SCYLV sont présents dans les champs commerciaux des deux îles.

2-1-Matériel et méthodes

2-1-1-Matériel

2-1-1-1- Procédure d'échantillonnage des champs commerciaux

En Guadeloupe, grâce aux données fournies par l'Association guadeloupéenne pour le recueil d'informations géographiques d'utilités agricoles (AGRIGUA) et les SICA, 47 parcelles commerciales en canne plantée, âgées de six à neuf mois, sont sélectionnées sur les bassins canniers de Guadeloupe : Nord Basse Terre (NBT), Est Basse Terre (EBT), Nord Est Basse Terre (NEBT), Nord Grande Terre (NGT), Ouest Grande Terre (OGT), Centre Est Grande Terre (CEGT) et Marie-Galante (MG).

Les cinq principaux cultivars commerciaux, B5992, B69566, B80689, R570, et R579 sont choisis pour cette étude. Chaque cultivar est présent dans au moins deux bassins. Dans chaque bassin, trois parcelles par cultivars sont choisies en vue du diagnostic viral.

Parmi les 47 parcelles choisies en canne plantée, 21 ont été récoltées à la fin de la saison et par conséquent échantillonnées quatre à six mois après la récolte.

Pour les cultivars B5992, R570, R579, les pépinières I du CTCS, plantées à partir des boutures des pépinières mères, et les pépinières II plantées à partir des boutures de ces pépinières I sont échantillonnées en vue du diagnostic du SCYLV.

En Martinique, grâce aux données fournies par le CTCS, 17 parcelles, âgées de moins de six mois après la plantation sont sélectionnées parmi les plantations alimentant les principales distilleries et l'usine sucrière du Galion : Saint-Pierre, La Trinité, Le Lamentin, Sainte-Luce et Rivière Pilote. Cinq cultivars sont également choisis : B5992, B69566, R570, B8008 et B82333.

Quinze parcelles parmi les 17 choisies en canne plantée, ont été récoltées et par conséquent échantillonnées en repousse deux à trois mois après la récolte.

Le nombre de feuilles échantillonnées en vue du diagnostic varie en fonction de la taille de la parcelle : 200, 300 ou 400 feuilles sont prélevées sur les parcelles de moins de 0,5 hectare, de 0,5 à un hectare et de plus d'un hectare respectivement. La marge d'erreur correspondante est d'environ 5%. Chaque parcelle est découpée en cinq quadrats (un quadrat central et quatre quadrats de bordure). Les feuilles sont prélevées de façon régulière dans les cinq quadrats. Seules les parcelles de pépinières ne sont pas divisées en quadrats compte-tenu de leur petite taille.

2-1-1-2-Détermination des populations d'aphides.

La présence et la densité des populations de *M. sacchari* sont évaluées sur les feuilles de 10% des plants échantillonnés pour le diagnostic viral. Un plant est considéré comme colonisé par le vecteur quand au moins une larve, un puceron ailé ou aptère est observé sur au moins une feuille par plant. L'intensité des populations est évaluée par une échelle semi-quantitative. La note « 0 » est attribuée lorsque aucun puceron n'est trouvé sur le plant, la note « 1 » quand un à dix pucerons sont trouvés sur l'ensemble des feuilles du plant, la note « 2 » pour onze à 50 pucerons et la note « 3 » pour plus de 50 pucerons.

2-1-2-Méthodes

2-1-2-1-Diagnostic par Immuno-empreinte

La présence du SCYLV est recherchée dans les échantillons de feuille par Immuno-empreinte (Figure 15). Cette méthode est couramment utilisée pour les diagnostics de routine car elle est rapide, précise et moins coûteuse que les méthodes de biologie moléculaire. Le faisceau central de la première feuille avec ochréa visible, est prélevé environ 10 cm après la gaine foliaire. La section transversale est apposée pendant deux secondes sur une membrane de nitrocellulose renforcé (Whatmann Schleicher&Schuell OPTITRAN BAS 85 de 0.45 µm d'épaisseur).

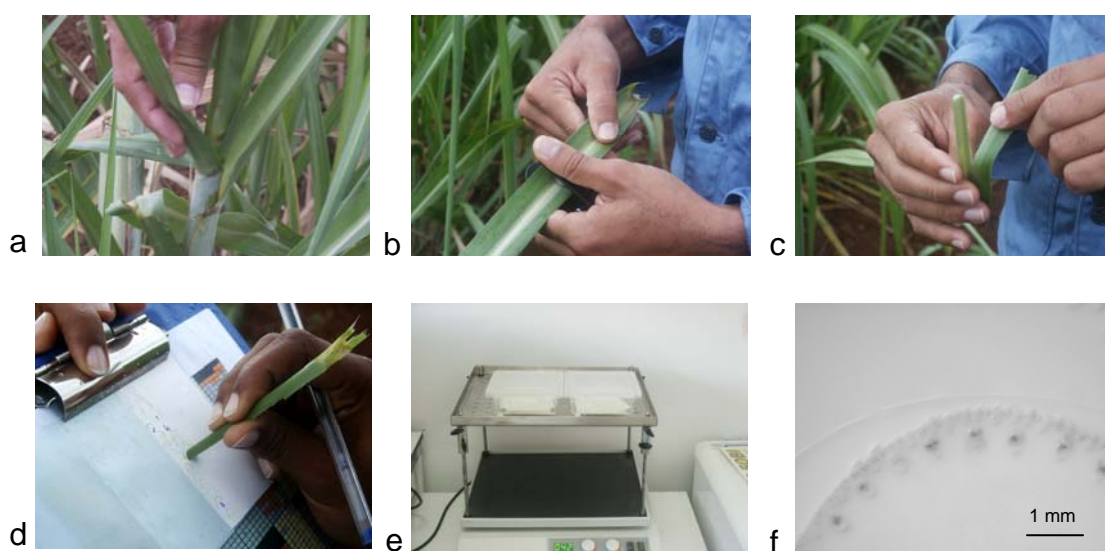


Figure 15 : Diagnostic par Immuno-Empreinte. a/ prélèvement de la feuille avec premier ochréa visible. b/ Section du limbe environ 10 cm après la gaine foliaire. c/ Elimination du limbe. d/ Impression sur membrane de nitrocellulose ; e/ Révélation des membranes. f/ Lecture à la loupe binoculaire.

Principe : Les particules virales étant localisées dans les cellules compagnes du phloème, lors de l'impression, elles sont transférées sur la membrane nitrocellulose. Leur présence est détectée par une double réaction immunologique. Le premier Anticorps (Ac), anti-SCYLV de lapin, est dirigé contre les sites antigéniques des particules virales. Le deuxième Ac, conjugué phosphatase alcaline anti-globuline de lapin, est dirigé contre le premier Ac. La réaction est révélée en ajoutant le substrat de l'enzyme (Figure 16).

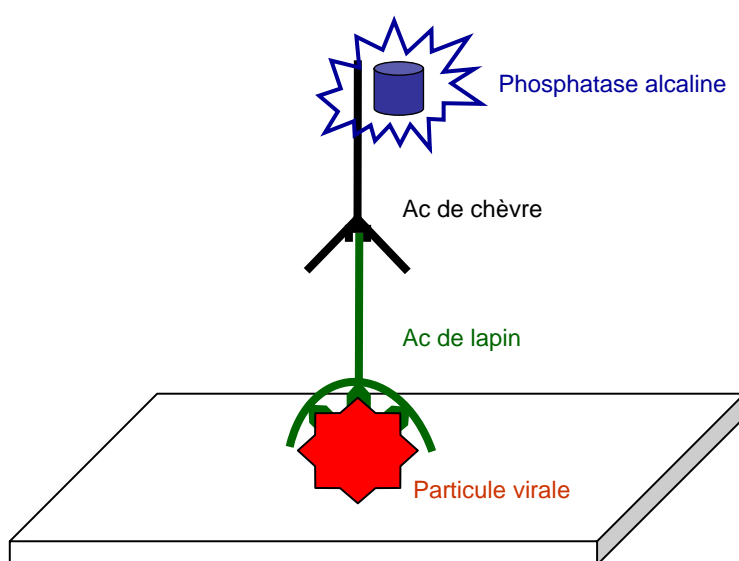


Figure 16 : Schéma de la double réaction immunologique permettant la visualisation des échantillons contaminés par le SCYLV.

Protocole : Les membranes sont traitées pendant 30 minutes avec de l'albumine bovine (SIGMA) dissoute à 3% dans du tampon TBS (8g/L de NaCl ; 2,42g/L de TRIS, qsp eau distillée, pH 7,5). Les membranes sont ensuite plongées pendant 90 minutes dans un bain de sérum de lapin anti-SCYLV (produit par B.E.L. Lockhart) dilué au 1/10000 dans du tampon TBS-Tween-BSA 1% (0,05% de Tween). Après trois rinçages successifs dans du tampon TBS-Tween, les membranes sont plongées pendant 75 minutes dans un bain contenant un sérum de conjugué phosphatase alcaline anti-IgG de lapin (SIGMA) dilué au 1/10000^e dans du TBS-Tween-BSA à 1%. Après trois nouveaux rinçages dans le TBS-Tween, les membranes sont plongées dans une solution de 5bromo-4chloro-3indoliphosphate BCIP/ NitroBlue Tetrazilum NTB (un comprimé de Fast Blue T. tablets Sigma pour 20 à 30 ml d'eau distillée) pendant environ 20 minutes. La réaction de coloration est arrêtée en plongeant les membranes dans de l'eau distillée.

Les réactions positives (coloration bleue) sont lues à la loupe binoculaire au grossissement 6,3.

2-1-2-2-Identification des génotypes présents

Parmi les 21 parcelles de Guadeloupe échantillonnées après la récolte, 11 sont sélectionnées selon le critère d'une parcelle par zone et par cultivar. De même, parmi les 15 parcelles de Martinique échantillonnées après la récolte, 13 sont sélectionnées. Cent feuilles par parcelle sont prélevées, imprimées, numérotées et conservées au frais ou congelée pour traitement ultérieur. Après révélation immunologique des membranes, les ARN sont extraits au laboratoire de la station de Neuf Châteaux du CIRAD en Guadeloupe, puis envoyés à l'UMR BGPI de Montpellier où nous avons procédé à l'identification des génotypes par Reverse Transcriptase-Polymerase Chain Reaction (RT-PCR).

Principe : Les ARN totaux extraits des échantillons de feuilles de canne à sucre, sont transcrits en ADN monocaténaire. Les brins d'ADN cible sont reconnus par des amorces spécifiques qui se placent à leurs extrémités, puis ils sont copiés à l'aide de réactions en chaîne. L'identification des génotypes du SCYLV est basée sur la différenciation des fragments spécifiques à chacun des génotypes en fonction de leurs poids moléculaires.

Extraction d'ARN

Les ARN totaux sont extraits à partir d'un ou de deux lots de 10 feuilles à l'aide du RNeasy plant mini kit (Qiagen). Les feuilles sont réduites en poudre dans un mortier froid avec de l'azote liquide et un pilon. Cent milligrammes de poudre sont mélangés au vortex avec 450µl de tampon de lyse RLT (RNeasy Lysis Buffer, 10µl de βmercapto-éthanol par millilitre de tampon). Le lysat est transvasé dans la colonne violette puis centrifugé à 20 000g pendant deux minutes. Le filtrat est ensuite mélangé au vortex avec 225µl d'éthanol à froid. Le mélange obtenu est transféré sur la colonne rose avec 700µl de tampon de lavage RW1 puis centrifugé 15 secondes à 8000g. Le filtrat est éliminé et la colonne est lavée et centrifugée 15 secondes à 8000g avec du tampon RPE (11ml de tampon RPE, 44 ml d'éthanol absolu). La colonne est lavée une deuxième fois avec le même tampon et centrifugé deux minutes à 20000g. L'extrait d'ARN est élué avec 40µl d'eau traitée au diethylpyrocarbonate (eau DEPC) et centrifugé une minute à 8000g. L'ARN est conservé à -20°C.

Transcription de l'ARN et amplification (RT-PCR)

La réaction de RT-PCR est réalisée avec le kit Ready-To-Go RT-PCR beads (Amersham Pharmacia, Ref. 27-9259-01), pour les génotypes BRA, CUB et le kit Qiagen One-step RT-PCR (n°210210) pour le génotype REU. Les génotypes BRA-PER, CUB et REU sont

identifiés à l'aide des amorces spécifiques BRA-PER-For/BRA-PER-Rev, CUB-For/CUB-Rev et REU-For/REU-Rev (Abu Ahmad *et al.*, 2006a).

Pour le kit Ready-To-Go RT-PCR beads (Amersham), chaque micro tube de réaction contient l'enzyme déshydratée sous forme de bille, 43µl d'eau DEPC garantie sans RNases, 5µl du couple d'amorce (2,5µl d'amorce FOR + 2,5µl d'amorce REV à 10µM), 1µl d'ARN et une goutte d'huile minérale. Le programme du thermocycleur comprend pour la phase de transcription inverse : 45 minutes à 45°C, 2 minutes à 95°C ; pour la phase d'amplification du fragment transcrit : une minute à 95°C, une minute à 56°C et une minute à 72°C pendant 35 cycles ; et pour la phase d'élongation : 10 minutes à 72°C. Le thermocycleur reste en pause à 10°C après la dernière étape.

Pour le kit Qiagen One-step RT-PCR, chaque micro tube de réaction contient 17,05µl d'eau DEPC, 5µl de tampon 5X, 0,5µl de dNTP, 0,1µl d'amorce For à 100µM, 0,1µl d'amorce Rev à 100µM, 1µl du mix de RT-PCR, 0,25µl d'inhibiteur de RNases, 1µl d'ARN et une goutte d'huile minérale. Le programme du thermocycleur comprend pour la phase de transcription inverse : 30 minutes à 50°C, 15 minutes à 94°C ; pour la phase d'amplification du fragment synthétisé : une minute à 94°C, une minute à 56°C et une minute à 72°C pendant 35 cycles ; et pour la phase d'élongation : 10 minutes à 72°C. Le thermocycleur reste en pause à 10°C après la dernière étape.

Electrophorèse

L'ADN amplifié, alourdi avec du bleu de charge (glycérol, bleu de bromophénol, Sodium Dodécyl Sulfate), est mis à migrer sur un gel d'agarose à 1% dans du tampon TBE 0,5X (TRIS, Acide Borique, EDTA) à 100V pendant 30 minutes (Figure 17).

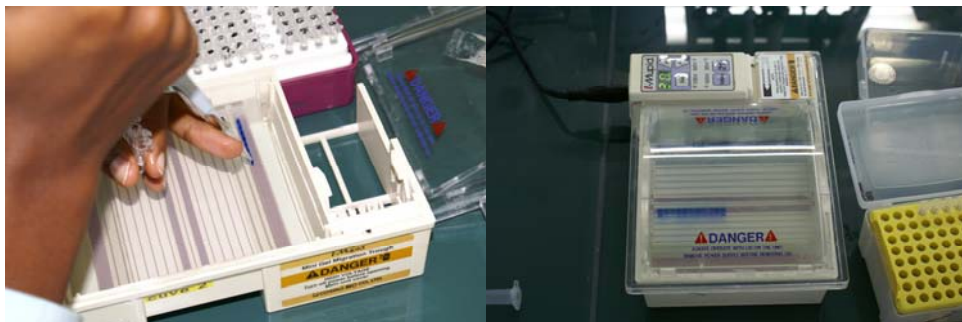


Figure 17 : Electrophorèse des amplifiats d'ADN obtenus à partir des extractions d'ARN des échantillons de feuilles de canne à sucre. A gauche, dépôt des amplifiats sur le gel

d'électrophorèse, à droite migration des échantillons à travers le gel parcouru d'un courant électrique.

Visualisation du fragment amplifié

Le fragment amplifié est visualisé sous UV après trempage du gel d'agarose dans un bain de Bromure d'Ethydium. Les bandes caractéristiques des produits d'amplification des génotypes BRA-PER, CUB et REU du SCYLV correspondent respectivement à des fragments de 362pb, 450pb et 905pb de taille (Figure 18).

Pour les parcelles présentant deux génotypes, les extractions sont réalisées feuille par feuille sur le deuxième lot.

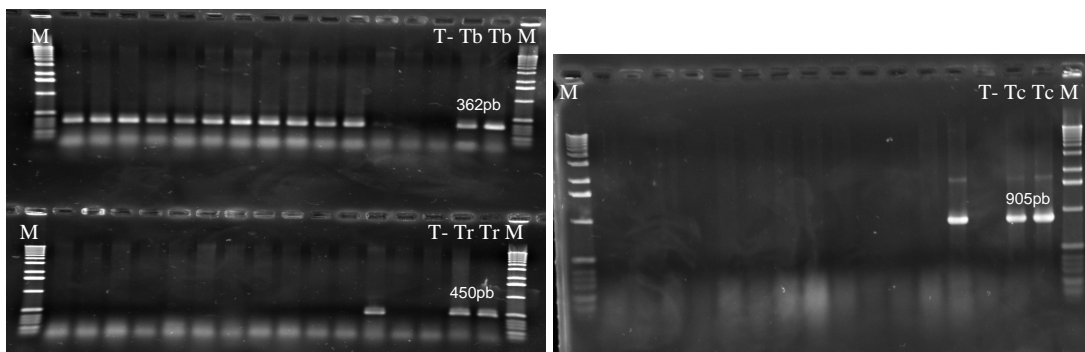


Figure 18 : Visualisation des fragments amplifiés (kit AMERSHAM pour 25µl) après séparation par électrophorèse et coloration au BET pour 13 échantillons. Sur la photographie de gauche, les échantillons d'ARN du haut ont été amplifiés avec les amorces spécifiques BRA FOR et BRA REV. Les échantillons du bas ont été amplifiés avec les amorces spécifiques CUB FOR et CUB REV. M=marqueur de poids moléculaire 1kb. T-=témoin négatif. Tb=témoin positif au génotype BRA. Tc=témoin positif au génotype CUB. Tr=témoin positif au génotype REU Les onze premiers échantillons sont contaminés par le génotype BRA-PER, le douzième par le génotype CUB. Le treizième échantillon est contaminé par le génotype REU.

2-1-2-3-Transmission du SCYLV via deux populations de *M. sacchari*

La capacité à transmettre le SCYLV de deux populations de *M. sacchari* est comparée. Ce deux populations sont issues de deux zones contrastées, l'une étant très infectée, et l'autre où le virus est pratiquement absent.

Multiplication *in vitro* des plantes

La variété utilisée pour ces tests est le cultivar du Brésil SP71-6163 disponible en culture *in vitro* et sensible au SCYLV (Vega *et al.*, 1997). Les plantules sont multipliées végétativement et mises à pousser dans du milieu de culture de Murashige et Skoog (50 ml de MS I, 50 ml de MS II, 10 ml de MS III, 2 ml de Vitamine de Fuji, 40 g de Saccharose, 0,1 g de Myo-inositol, qsp 1l d'eau distillée, pH à 5,6). Deux mois avant les tests, les plantules sont repiquées dans des tubes (148mm de long, 24mm de diamètre, Figure 19).



Figure 19 : Plantule de la variété SP71-6163 repiquée en tube sur milieu de culture de Murashige et Skoog.

Prélèvement et élevage des pucerons

Pour cette étude, une population de *M. sacchari* est prélevée à Marie-Galante et une autre population est prélevée à Roujol en Guadeloupe. Afin d'obtenir des pucerons indemnes de SCYLV et d'isoler les deux populations, les adultes sont mis à pondre pendant trois jours sur une feuille en survie prélevée sur des plants sains de SP71-6163 et nettoyée à l'alcool à 90°.

Les larves sont récoltées et déposées sur de nouvelles feuilles en survie nettoyées à l'alcool à 90° et ce pendant trois générations (Figure 20).



Figure 20 : Dépôt des larves sur feuilles en survie à l'aide d'un pinceau.

Acquisition du SCYLV

Après avoir assaini les populations, les adultes sont mis à pondre sur des feuilles en survie nettoyées à l'alcool à 90° de R578 (prélevée dans la collection) infectées par le génotype REU. Les larves sont conservées quatre jours sur les feuilles infectées par le SCYLV afin d'acquérir le SCYLV.

Transmission du SCYLV

Les larves supposées virulifères sont déposées sur les plantules saines de SP71-6163 à raison de trois pucerons par plantule, et de 35 plantules par population pendant cinq jours.

Sevrage des *vitro* plants

Les pucerons sont éliminés avec une pulvérisation de Confidor à 100ppm (0.05g/l d'imidaclopride).

Les plantules sont sevrées dans un bain fongicide d'Aliette Flash (80% de fosétyl-Al ou tris-O-éthyl phosphonate d'aluminium $C_6H_{18}AlO_9P_3$) à 1g/l, puis repiquées dans une pastille jiffy-7 de 41mm de diamètre, laissées 24 heures en salle de transition (luminosité et ventilation faibles). Elles sont ensuite placées sous serre avec ombrière à arrosage automatique. L'engrais Mairiol® (14% d'azote N, 12% de phosphore P et 15% de potassium K), est apporté en solution par l'arrosage.

Le même procédé, du prélèvement des deux populations de vecteur au sevrage des *vitro* plants, est répété pour réaliser un deuxième essai.

2-1-2-4-Analyses statistiques

Les données brutes recueillies par observation sur le terrain et analyse en laboratoire sont traitées avec les logiciels SAS version 9.1 et Statistica 7.1.

Les proportions de plantes contaminées par le virus ou les proportions de plantes colonisées par le vecteur sont transformées à l'aide d'une fonction arc sinus de la racine carrée avant d'être soumises aux tests statistiques.

Les intensités de populations de vecteur représentées par une échelle de notation sont soumises à une transformation racine carrée.

Les moyennes sur les données brutes sont calculées avec la procédure « Mean ». Les tests statistiques sur le jeu de données : normalités, quantiles, courbes de probabilité normale sont réalisées avec la procédure « Univariate ». Le test de Fisher, le test t de Student et l'analyse de variance sur les mesures répétées sont réalisés avec la procédure « General Linear Model ».

2-2-Résultats

2-2-1-Archipel Guadeloupe

2-2-1-1-Répartition du SCYLV et de M. sacchari en Guadeloupe en canne plantée

Le SCYLV a été détecté dans tous les cultivars et dans tous les bassins de culture échantillonnés lors cette étude sur l'archipel de Guadeloupe (Tableau 1). La distribution des données de contamination par le SCYLV transformées à l'aide d'une fonction arc sinus se rapproche d'une distribution selon la loi normale (Figure 21). Il n'y a pas de différence significative entre les zones de prélèvement pour une parcelle donnée : les quadrats de bordure et le quadrat central présentent des taux d'infection semblables ($p=0,559$, Annexe 4 : Tableau 4-1). De plus, dans un bassin donné et pour un cultivar donné, les taux d'infection des trois parcelles sont similaires, sauf pour R579 en CEGT où l'infection varie de 8 à 35% (Annexe 1). Par contre, des différences entre cultivars sur certains bassins sont

identifiées en CEGT, EBT et NBT (Tableau 1). Les plus forts taux d'infection par le SCYLV sont observés pour R579 en CEGT, OGT et NBT, pour B80689 en CEGT et pour B5992 en EBT. Ces deux cultivars se distinguent du cultivar B69566 qui est le moins contaminé (Figure 21). Les plus faibles taux sont observés à Marie-Galante (Tableau1). Cependant, MG, NEBT et NGT sont les zones les moins contaminées, elles diffèrent significativement de EBT, CEGT et NGT (Figure 22).

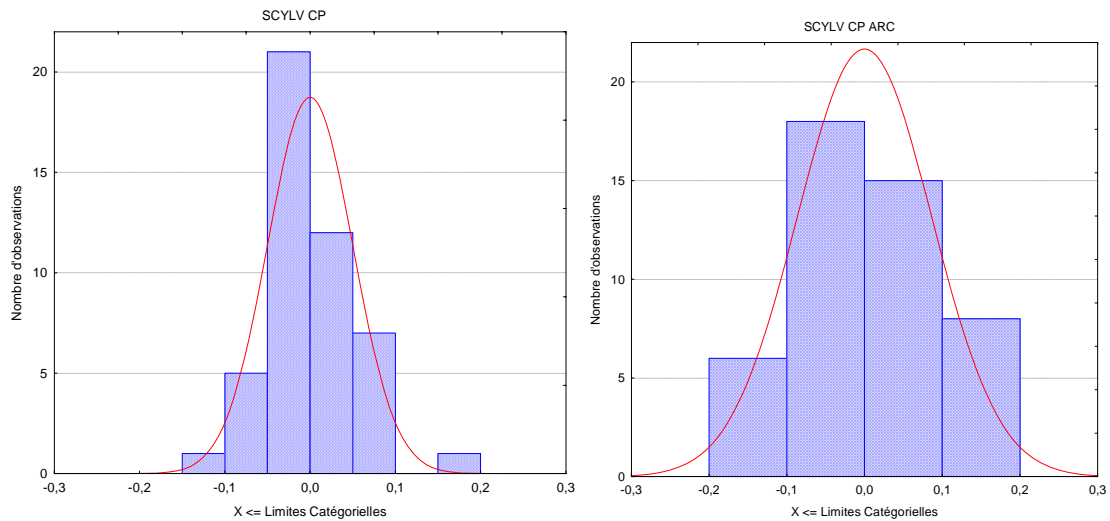


Figure 21 : Comparaison des histogrammes des résidus bruts pour les contaminations par le SCYLV en canne plantée (CP) en Guadeloupe avant la transformation Arc sinus (gauche) et après transformation Arc sinus.

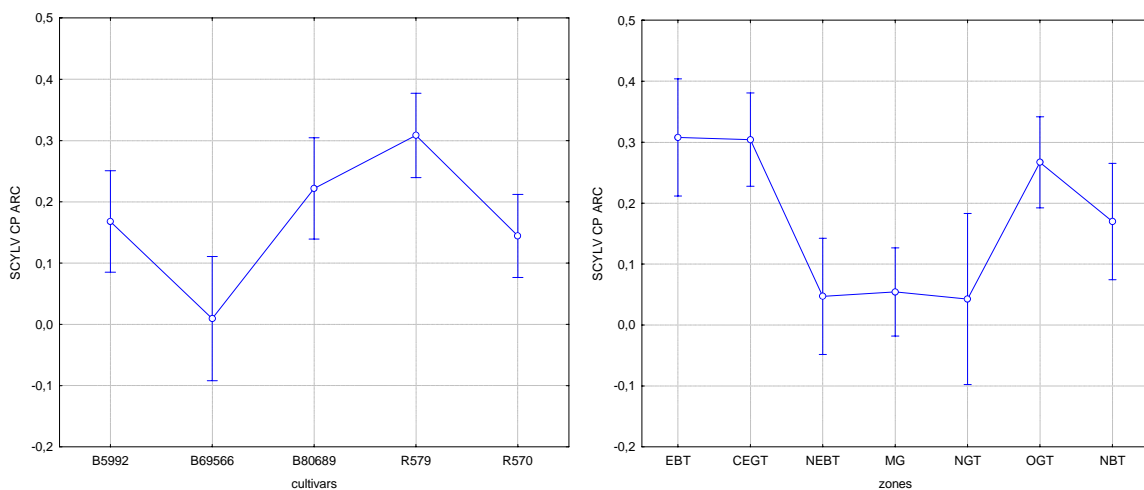


Figure 22 : Moyenne des contaminations par le SCYLV en canne plantée CP en Guadeloupe et intervalles de confiance à 95% associés en fonction des cultivars (graphe de gauche) et des zones (graphe de droite).

Le vecteur a été observé sur tous les cultivars et dans tous les bassins de culture de l'archipel de Guadeloupe (Tableau 1). De même que pour le SCYLV, la distribution des données de colonisation par *M. sacchari* transformées à l'aide d'une fonction arc sinus se rapproche d'une distribution selon la loi normale (Figure 21). Aucune variation significative de la colonisation des plantes par le vecteur n'est trouvée entre les zones (Figure 24). Cependant, le cultivar B69566 est significativement plus colonisé que le cultivar R579. Le nombre de plants colonisés par le vecteur ainsi que l'intensité des populations varient beaucoup d'une parcelle à l'autre d'un même cultivar dans un bassin donné (Tableau 1) Cependant, il y a un effet significatif de la zone de culture ($p=0,036$) et du cultivar ($p=0,012$) sur l'intensité des populations (Annexe 5 : Tableau 5-1).

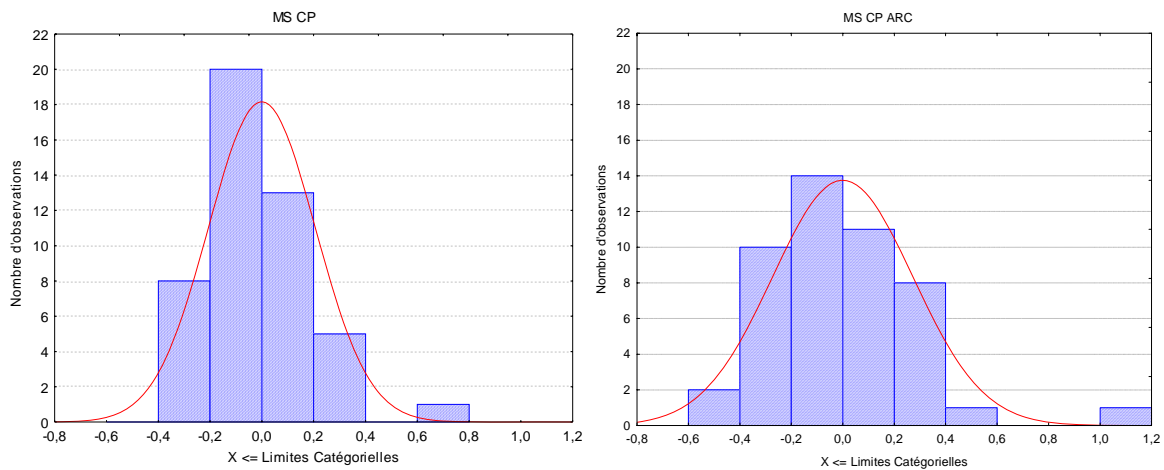


Figure 23 : Histogramme des résidus bruts pour les contaminations par le SCYLV en canne plantée (CP) en Guadeloupe avant la transformation Arc sinus (graphe de gauche) et après transformation Arcsinus (graphe de droite).

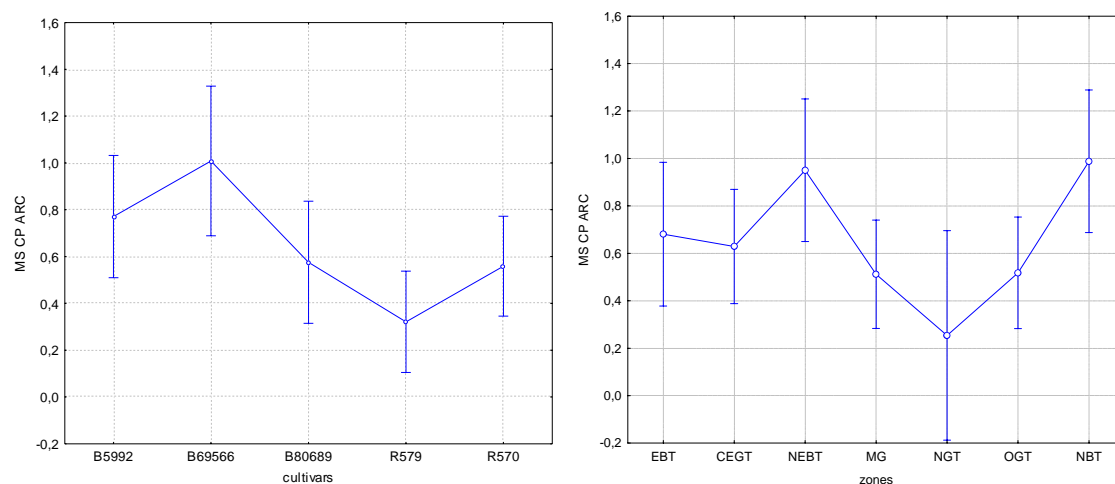


Figure 24 : Moyenne des colonisations par *M. sacchari* en Guadeloupe et intervalles de confiance à 95% associés en fonction des cultivars (g raphe de gauche) et des zones (graphe de droite).

Tableau 1. Taux d'infection par le SCYLV et de colonisation par *M. sacchari* en fonction du cultivar et de la zone en canne plantée (CP) en Guadeloupe.

cultivar	zone	virus CP		vecteur CP	
		taux de contamination ¹	taux de colonisation ²	Intensité ³	
B5992 (2)	CEGT	2,42 ± 0,12 ⁴	45,00 ± 6,93 ⁴	1,92 ± 0,81 ⁴	
B5992 (3)	EBT	16,22 ± 4,25	43,33 ± 8,15	1,02 ± 0,05	
B5992 (3)	OGT	6,61 ± 3,06	45,52 ± 9,97	1,35 ± 0,06	
B69566 (3)	EBT	0,25 ± 0,23	80,83 ± 10,92	1,18 ± 0,32	
B69566 (3)	MG	0,00 ± 0,00	50,00 ± 16,66	1,11 ± 0,12	
B80689 (3)	CEGT	17,83 ± 4,19	37,67 ± 49,98	1,43 ± 0,68	
B80689 (3)	MG	0,22 ± 0,36	13,33 ± 10,67	1,00 ± 0,00	
B80689 (3)	NGT	0,89 ± 0,18	5,44 ± 6,46	1,25 ± 0,35	
R570 (3)	MG	0,00 ± 0,00	36,67 ± 17,14	1,23 ± 0,20	
R570 (3)	NBT	1,28 ± 0,87	55,83 ± 32,37	1,14 ± 0,14	
R570 (3)	NEBT	0,50 ± 0,23	60,83 ± 30,50	1,30 ± 0,20	
R570 (3)	OGT	7,30 ± 5,95	4,22 ± 1,96	1,00 ± 0,00	
R579 (3)	CEGT	21,08 ± 12,83	9,17 ± 14,67	1,18 ± 0,00	
R579 (3)	NBT	11,33 ± 0,31	42,22 ± 12,82	1,26 ± 0,08	
R579 (3)	NEBT	1,89 ± 0,47	32,22 ± 32,93	1,22 ± 0,19	
R579 (3)	OGT	15,20 ± 3,70	11,00 ± 7,89	1,07 ± 0,11	

¹ moyenne des proportions de plants positifs par Immuno-empreinte pour les parcelles d'un même cultivar dans une même zone.

² moyenne des proportions de plants colonisés par le puceron vecteur pour les parcelles d'un même cultivar dans une même zone.

³ moyenne des notes obtenues pour les parcelles d'un même cultivar dans une même zone. Les notes données à chaque plant varient de 1 à 3 en fonction du nombre de pucerons observés sur le plant.

⁴ intervalle de confiance de sécurité 95%.

Le nombre de parcelles prises en compte dans le calcul de la moyenne est indiqué entre parenthèses dans la colonne cultivar.

2-2-1-2-Evolution de l'incidence du SCYLV et de *M. sacchari* entre deux cycles de culture.

L'infection par le SCYLV augmente d'un cycle de culture à l'autre en Guadeloupe : de 6% en CP à 10,2% en R1 (Tableau 2). La transformation Arc sinus ne suffit pas à stabiliser la variance des données de contaminations par le SCYLV (Figure 25). Malgré les écarts par rapport à une loi normale, les données sont tout de même analysées avec la procédure GLM qui tolère les écarts à la normalité. Les plus fortes progressions sont constatées pour le cultivar B5992 en CEGT (2,42 en CP et 9,25 en R1) et le cultivar B80689 en NGT (1% en CP et 6% en R1). Le cultivar B69566 à Marie-Galante reste non contaminé alors que R570 montre une faible augmentation (0 en CP et 0,25% en R1, Tableau 2). Il y a une augmentation significative ($p=0,000$) de l'incidence du SCYLV d'un cycle à l'autre (Annexe 6 : Tableau 6-6). Il n'y a pas de différence significative entre les cultivars, cependant, il y a des différences entre zones (Figure 26). CEGT se distingue de NEBT et MG. De plus, les différences d'évolution observées entre les cultivars ne sont significatives qu'au seuil 10% : la probabilité que l'évolution des cultivars entre les deux cycles de culture soit différente est de $p=0,071$ (Annexe 6, Tableau 6-6). CEGT est la zone la plus contaminée par le SCYLV, cependant, elle ne se distingue que de NEBT et MG (Figure 26).

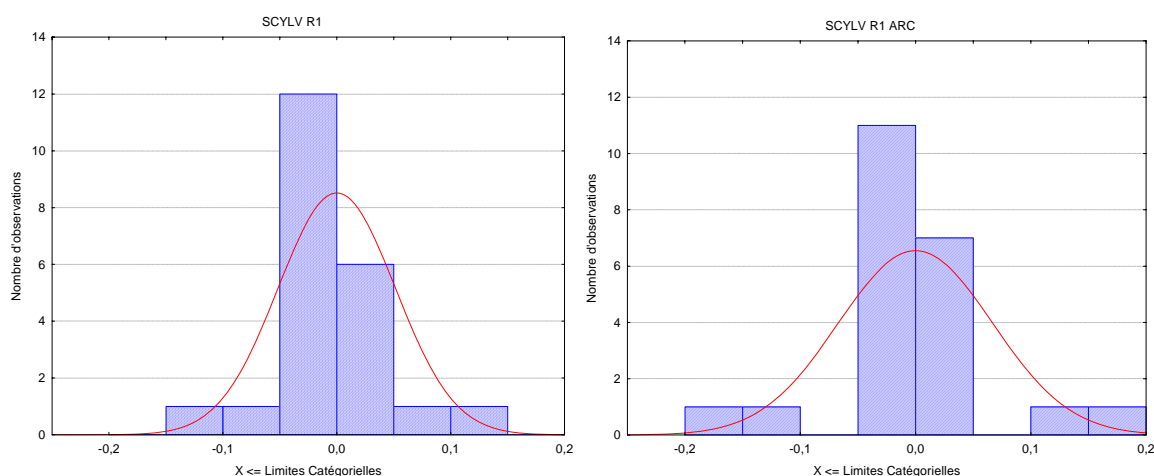


Figure 25 : Comparaison des histogrammes des résidus bruts pour les contaminations par le SCYLV en repousse R1 en Guadeloupe avant la transformation Arc sinus (graphe de gauche) et après transformation Arc sinus (graphe de droite).

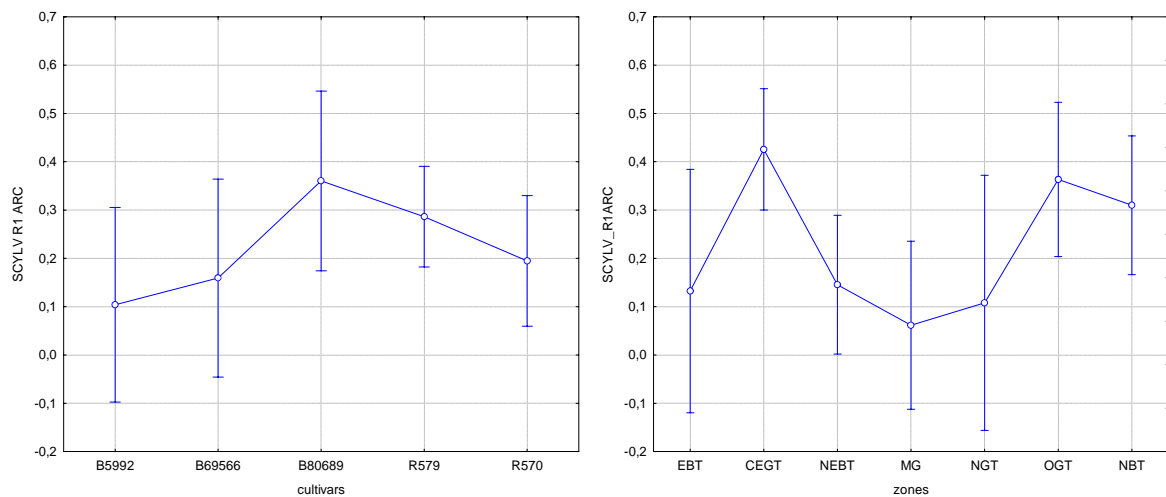


Figure 26 : Moyenne des contaminations par le SCYLV en repousse (R1) en Guadeloupe et intervalles de confiance à 95% associés en fonction des cultivars (graphe de gauche) et des zones (graphe de droite).

Les taux de colonisation par le vecteur varient tout autant en première repousse. De même que pour les contaminations par le SCYLV, la transformation Arc sinus ne suffit pas à stabiliser la variance des données de colonisations par *M. sacchari* (Figure 27). De même que précédemment, malgré les écarts par rapport à une loi normale, les données sont tout de même analysées avec la procédure GLM qui tolère les écarts à la normalité. Il n'y a pas de différence significative entre cultivar ni entre zones (Figure 28). De plus, il y a une grande variabilité entre les parcelles des cultivars B80689 et R570, et entre les parcelles de NBT (Figure 28). Par contre, il y a très peu de variabilité entre les parcelles de R579.

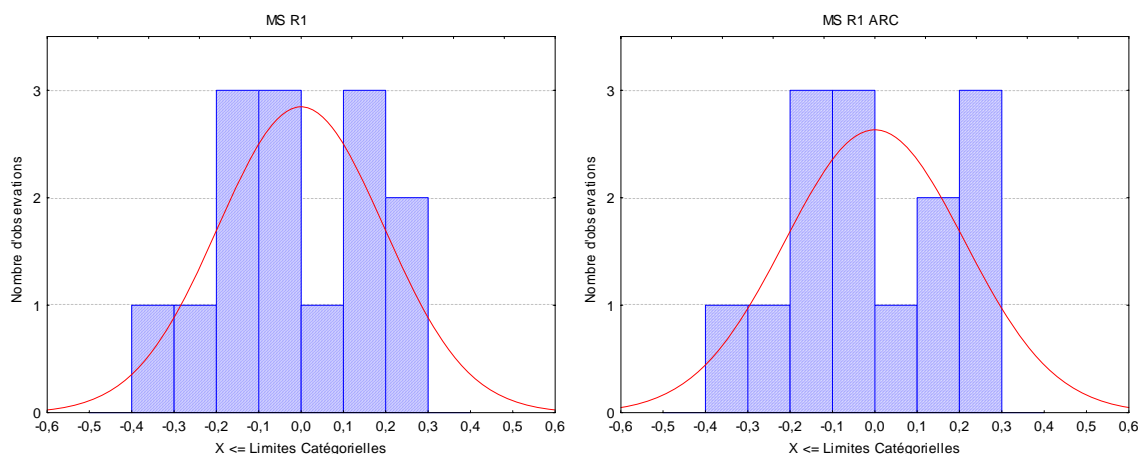


Figure 27 : Comparaison des histogrammes des résidus bruts pour la colonisation par *M. sacchari* en repousse R1 en Guadeloupe avant la transformation Arc sinus (graphe de gauche) et après transformation Arc sinus (graphe de droite).

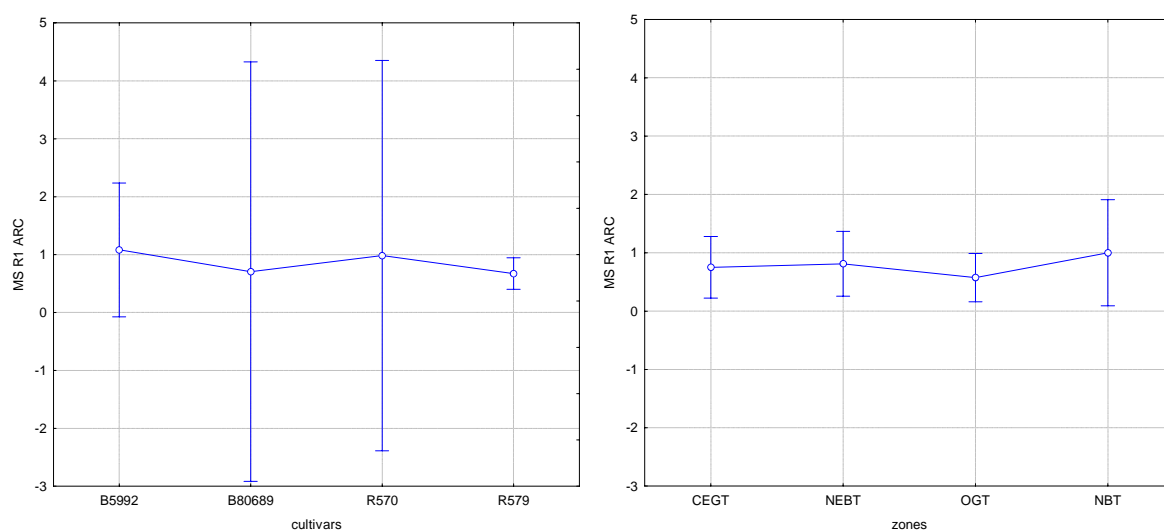


Figure 28 : Moyenne des colonisations par *M. sacchari* en Guadeloupe et intervalles de confiance à 95% associés en fonction des cultivars (graphe de gauche) et des zones (graphe de droite).

Tableau 2. Evolution des taux d'infection par le SCYLV entre la canne plantée (CP) et la première repousse (R1) en fonction du cultivar et de la zone de Guadeloupe.

cultivar	zone	taux d'infection CP	taux d'infection R1
B5992 (2)	CEGT	2,42 ± 0,12	9,25 ± 1,04
B69566 (2)	EBT	0,13 ± 0,14	0,50 ± 0,00
B69566 (2)	MG	0,00 ± 0,00	0,00
B80689 (2)	CEGT	15,75 ± 3,11	28,75 ± 5,20
B80689 (1)	NGT	1,00	6,00
R570 (1)	NBT	2,33	6,67
R570 (1)	NEBT	0,75	2,00
R570 (2)	MG	0,00 ± 0,00	0,25 ± 0,35
R579 (2)	CEGT	21,38 ± 15,70	23,74 ± 18,58
R579 (1)	NBT	11,67	23,50
R579 (2)	NEBT	1,83 ± 0,57	4,00 ± 1,39
R579 (3)	OGT	15,20 ± 3,70	17,37 ± 3,23

¹ moyenne des proportions de plants positifs par Immuno-empreinte pour les parcelles d'un même cultivar dans une même zone. Les moyennes tiennent compte uniquement des parcelles échantillonnées en CP et en R1.

² l'intervalle de confiance de sécurité 95%.

Le nombre de parcelles prises en compte dans le calcul de la moyenne est indiqué entre parenthèses dans la colonne cultivar.

2-2-1-3-Répartition des géotypes du SCYLV en Guadeloupe

Le géotype REU a été détecté dans tous les cultivars et dans tous les bassins de culture de l'archipel Guadeloupe (Tableau 3). Le géotype BRA-PER a été détecté dans le cultivar R579 en NBT et NEBT, et le géotype CUB a été détecté dans le cultivar B5992 en OGT, et dans le cultivar R579 en CEGT et OGT (Tableau 3). Quand deux géotypes coexistent au sein d'une même parcelle, le géotype REU est toujours le plus fréquent (Tableau 3). Les géotypes REU et CUB ont été trouvés dans une même feuille du cultivar B5992 (Tableau 3).

Tableau 3. Nombre de feuilles positives par Immuno-empreinte infectées par les géotypes du SCYLV en Guadeloupe.

cultivar	zone	nb d'échantillons	BRA-PER	CUB	REU	CUB + REU
B5992	CEGT	10	0	0	10	0
B5992	EBT	21	0	0	21	0
B5992	OGT	10	0	0	9	1
B80689	CEGT	36	0	0	36	0
R570	NBT	2	0	0	2	0
R570	NEBT	1	0	0	1	0
R579	NBT	7	1	0	6	0
R579	CEGT	26	0	0	26	0
R579	NEBT	7	1	0	6	0
R579	OGT	27	0	1	26	0
		147	2	1	143	1

2-2-1-4-Incidence du SCYLV d'une étape à l'autre du schéma de pépinière

Le SCYLV est présent dans tous les cultivars des pré-pépinières et des pépinières commerciales échantillonnés en Guadeloupe continentale lors de cette étude (Tableau 4). L'incidence du SCYLV varie entre les cinq pépinières. De plus, l'incidence du SCYLV dans les pépinières du cultivar R570 est significativement inférieure à celle des pépinières des cultivars R579 ($p=0,033$) et B5992 ($p=0,048$) en considérant les deux étapes de pépinières (Annexe 7 : Tableau 7-3). Les taux d'infection des deux étapes sont 9,8 et 10,5%. Ces taux ne sont pas significativement différents ($p=0,781$). Bien qu'aucune interaction entre cultivars et étape de pépinière ne soit mise en évidence ($p=0,431$), les taux d'infection des cultivars

R570 et B5992 diminuent lors du passage des pépinières secondaires aux pépinières tertiaires (Tableau 4). Par contre, le taux d'infection par le SCYLV du cultivar R579 augmente dans les pépinières tertiaires (Tableau 4).

Tableau 4. Progression de l'incidence du SCYLV des pépinières secondaires (CTCS) aux pépinières tertiaires. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de parcelles

Cultivar	Zone	Pourcentage de plants infectés dans les pépinières II	Pourcentage de plants infectés dans les pépinières III
B5992	CEGT	17,3 (1)	13(1)
R570	NGT	7,0 (1)	3 (1)
R570	NBT	2,5 (1)	0,5 (1)
R579	NBT	8,0 (1)	10,5 (3)
R579	NGT	14,0 (1)	25,5 (1)

2-2-1-5-Transmission du SCYLV via deux populations de *M. sacchari*

Deux populations de *M. sacchari* issues de deux zones contrastées, l'une étant très infectée Petit-Bourg (Roujol, données non présentées), et l'autre où le virus est pratiquement absent Marie-Galante, sont comparées quand à leur capacité à transmettre le SCYLV.

Lors des deux essais de transmission du SCYLV à des plantes saines du cultivar SP71-6163 multiplié en *c. i. v.*, la population de pucerons prélevées à Marie-Galante et celle prélevée à Roujol ont toutes deux été capables de transmettre le SCYLV (Figure 29).

Lors du premier essai, 1/36 des plants de SP71-6163 inoculés par les populations de pucerons de Marie-Galante et 1/36 des plants de SP71-6163 inoculés par les populations de pucerons de Roujol sont diagnostiqués positifs au SCYLV par Immuno-empreinte (Figure 29).

Lors du deuxième essai, 14/34 des plants de SP71-6163 inoculés par les populations de pucerons de Marie-Galante et 14/35 des plants de SP71-6163 inoculés par les populations de pucerons de Roujol sont diagnostiqués positifs au SCYLV par Immuno-empreinte (Figure 29).

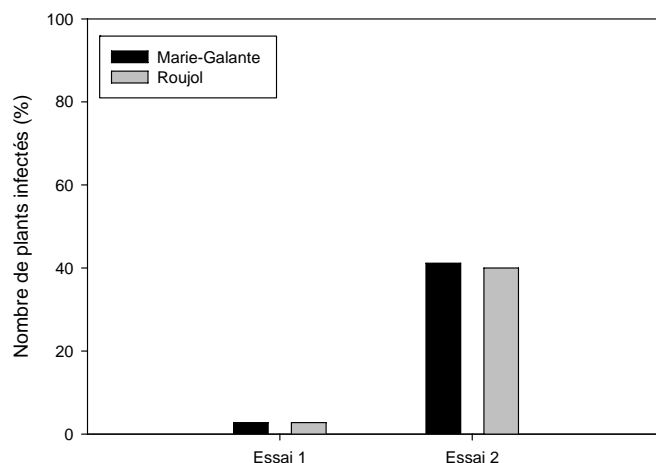


Figure 29. Pourcentage de plants diagnostiqués positifs au SCYLV par Immuno-empreinte après transmission par *M. sacchari* lors des deux essais.

2-2-2-Martinique

2-2-2-1-Répartition et taux d'infection du SCYLV en canne plantée

Le SCYLV a été détecté dans tous les cultivars et dans tous les bassins de culture échantillonnés lors de cette étude en Martinique (Tableau 5). La transformation Arc sinus ne suffit pas à stabiliser la variance des données de contaminations par le SCYLV en canne plantée (Figure 30). De même que précédemment, malgré les écarts par rapport à une loi normale, les données sont tout de même analysées avec la procédure GLM qui tolère les écarts à la normalité. De même qu'en Guadeloupe, il n'y a pas de différence significative ($p=0,693$) entre les quadrats d'une parcelle (Annexe 8 : Tableau 8-1). De plus, il n'y a pas de différence significative entre les cultivars ni entre les zones de Martinique (Figure 31). Les plus forts taux d'infection par le SCYLV ont été observés au Lamentin (Tableau 5) bien que cette zone ne se distingue pas significativement des autres (Figure 31). Les cultivars B5992 et B8008 présentent les plus forts taux de contamination. L'infection varie de 16 à 83% pour B5992 et de 7 à 99% pour B8008 (Tableau 5). Le cultivar R570 est le moins infecté avec environ 7% (Tableau 5). Les taux d'infection des parcelles du cultivar B69566 sont variables dans un même bassin et entre bassins (Tableau 5).

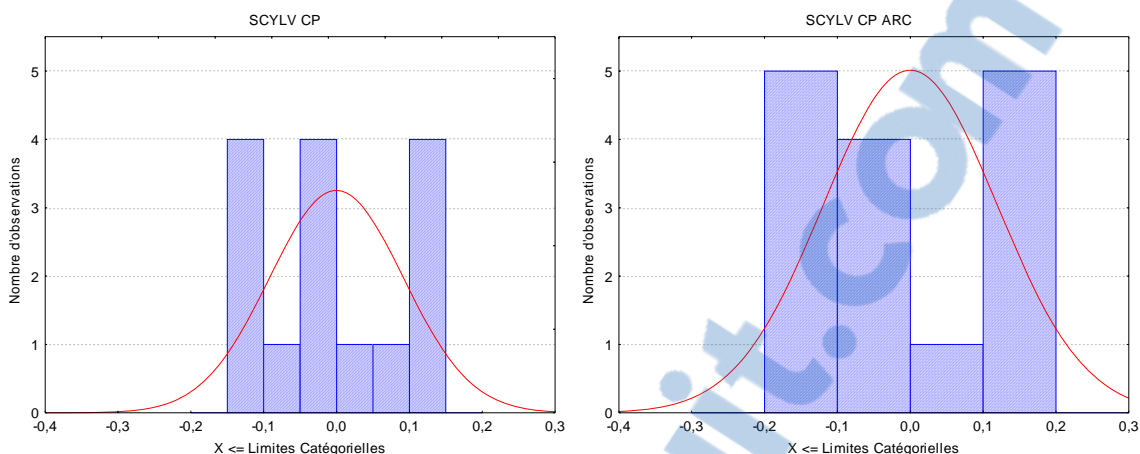


Figure 30 : Comparaison des histogrammes des résidus bruts pour les contamination par le SCYLV en Martinique en canne plantée (CP) avant la transformation Arc sinus (graphe de gauche) et après transformation Arc sinus (graphe de droite).

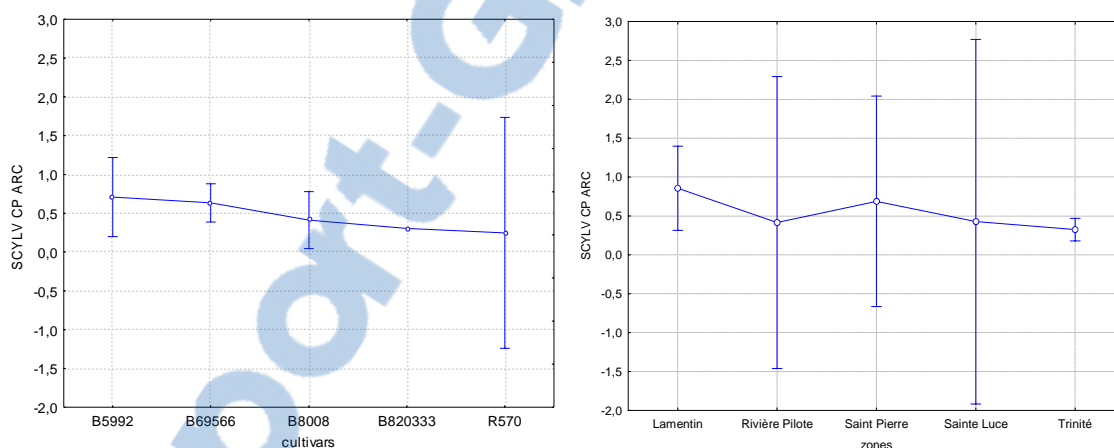


Figure 31 : Moyenne des contaminations par le SCYLV en Martinique et intervalles de confiance à 95% associés en fonction des cultivars (graphe de gauche) et des zones (graphe de droite).

Le vecteur a été observé sur tous les cultivars et dans tous les bassins de culture de Martinique échantillonnés lors de cette étude (Tableau 5). La distribution des données de colonisation se rapproche d'une distribution selon une loi normale après transformation arc sinus (Figure 32). De même qu'en Guadeloupe, aucune variation significative de la colonisation des plantes par le vecteur n'a été trouvée entre les bassins ni entre les cultivars (Figure 33). Le nombre de plants colonisés par le vecteur ainsi que l'intensité des populations varient beaucoup d'une parcelle à l'autre d'un même cultivar dans un bassin

donné (Tableau 5). Il n'y a pas d'effet significatif du cultivar ($p=0,465$) ou de la zone de culture ($p=0,071$) sur l'intensité des populations de *M. sacchari* (Annexe 9 : Tableau 9-1)

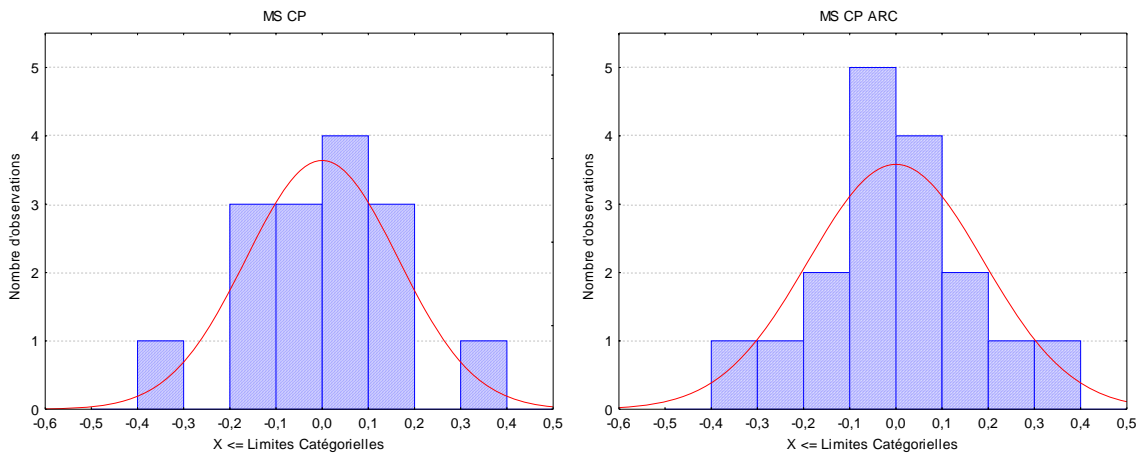


Figure 32 : Comparaison des histogrammes des résidus bruts pour les colonisations par *M. sacchari* en Martinique en canne plantée (CP) avant la transformation Arc sinus (graphe de gauche) et après transformation Arc sinus (graphe de droite).

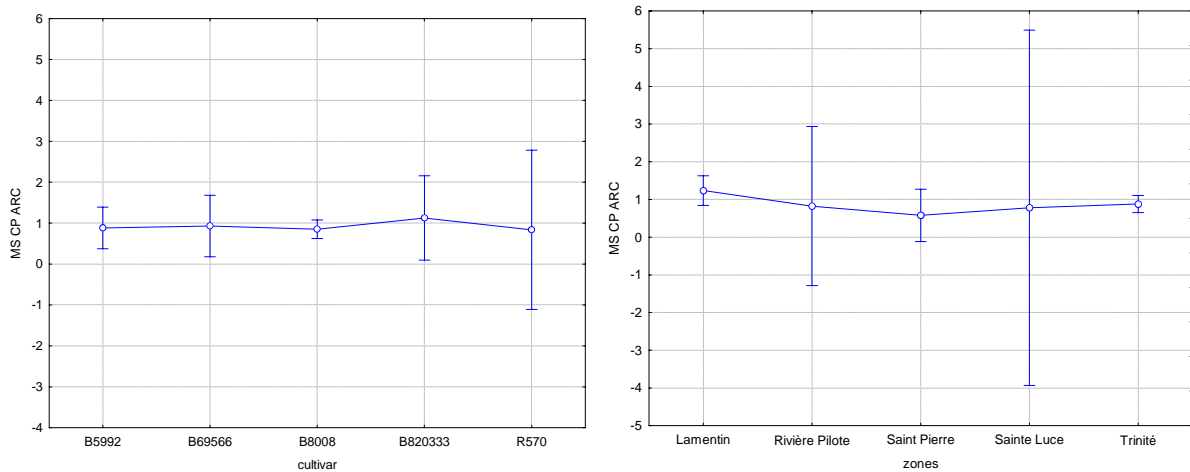


Figure 33 : Moyenne des colonisations par *M. sacchari* en canne plantée (CP) en Martinique et intervalles de confiance à 95% associés en fonction des cultivars (graphe de gauche) et des zones (graphe de droite).

Tableau 5. Taux d'infection par le SCYLV et de colonisation par *M. sacchari* en fonction du cultivar et de la zone en canne plantée (CP) en Martinique.

cultivar	zone	virus CP		vecteur CP	
		taux d'infection ¹	taux de colonisation ²	intensité des populations	
B5992 (2)	Lamentin	82,13 ± 1,91 ³	86,25 ± 5,20 ³	1,27 ± 0,14 ³	
B5992 (2)	Sainte Luce	19,39 ± 18,86	49,56 ± 46,80	1,12 ± 0,17	
B5992 (1)	Trinité	16,50	20,00	1,06	
B69566 (2)	Lamentin	30,67 ± 17,09	87,50 ± 17,32	1,46 ± 0,24	
B69566 (2)	Saint Pierre	40,63 ± 10,17	30,00 ± 6,93	1,37 ± 0,32	
B8008 (2)	Rivière Pilote	17,75 ± 14,90	53,75 ± 22,52	1,14 ± 0,10	
B8008 (2)	Trinité	57,25 ± 57,86	59,17 ± 5,77	1,37 ± 0,00	
B82333 (2)	Trinité	13,00 ± 5,54	81,25 ± 8,66	1,44 ± 0,22	
R570 (2)	Trinité	7,17 ± 7,62	55,00 ± 20,79	1,10 ± 0,00	

¹ moyenne des proportions de plants positifs par Immuno-empreinte pour les parcelles d'un même cultivar dans une même zone.

² moyenne des proportions de plants colonisés par le puceron vecteur pour les parcelles d'un même cultivar dans une même zone.

³ intervalle de confiance de sécurité 95%.

2-2-2-2- Evolution de l'incidence du SCYLV entre deux cycles de culture

L'infection par le SCYLV augmente d'un cycle de culture à l'autre en Martinique pour quatre des cinq cultivars (Tableau 6). La transformation des données de contamination ne suffit pas à stabiliser la variance (Figure 34). De même que précédemment, malgré les écarts par rapport à une loi normale, les données sont tout de même analysées avec la procédure GLM qui tolère les écarts à la normalité. Il y a toujours autant de variations pour ces quatre cultivars en repousse (Tableau 6). En effet, l'infection varie de 16 à 82% en canne plantée et de 31 à 98% en première repousse pour B5992 et de 15 à 18% en canne plantée et de 19 à 52% en première repousse pour B8008 (Tableau 6). Le cultivar R570 reste le moins infecté sur l'ensemble des deux cycles, bien qu'il présente la plus forte progression (7% en CP et 22% en R1). Il n'y a aucune différence significative entre cultivars ni entre zones en

repousse (Figure 35). Seuls les cultivars ayant deux valeurs dans une zone donnée sont considérés dans l'analyse de variance. Par conséquent il y a des effets cultivar/zones qui ne peuvent être dissociés en canne plantée (Annexe 10 : Tableau 10-1). Par contre, il n'y a plus d'effet cultivar/zones en repousse (Annexe 10 : Tableau 10-2).

Par contre, l'infection par le SCYLV diminue significativement en repousse pour le cultivar B69566 (Tableau 6). La plus forte diminution est observée à Saint-Pierre où les taux de contamination des parcelles de B69566 passent de 41% à 24%. Le Lamentin reste le bassin où se trouvent les parcelles les plus contaminées, bien qu'il ne se distingue pas significativement des autres (Figure 35).

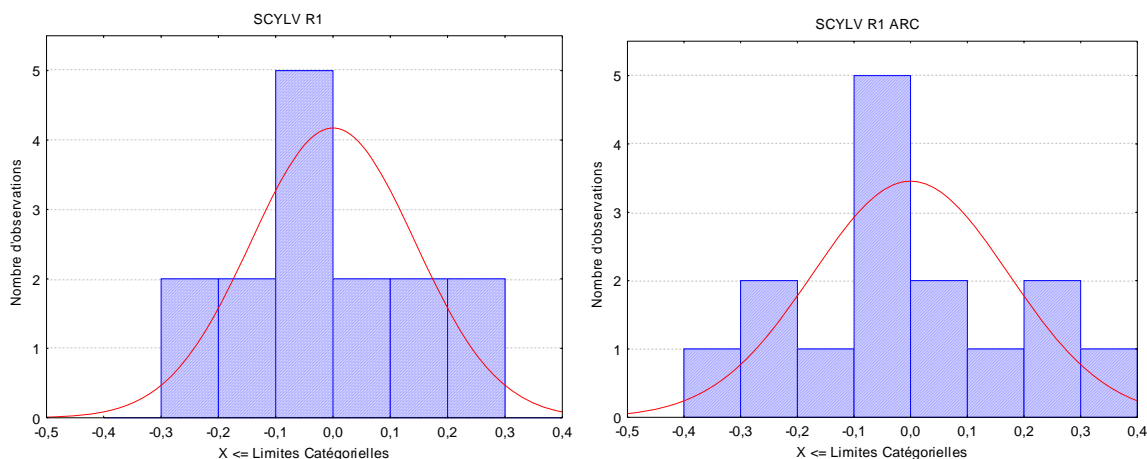


Figure 34 : Comparaison des histogrammes des résidus bruts pour les contaminations par le SCYLV en Martinique en repousse (R1) avant la transformation Arc sinus (graphe de gauche) et après transformation Arc sinus (graphe de droite).

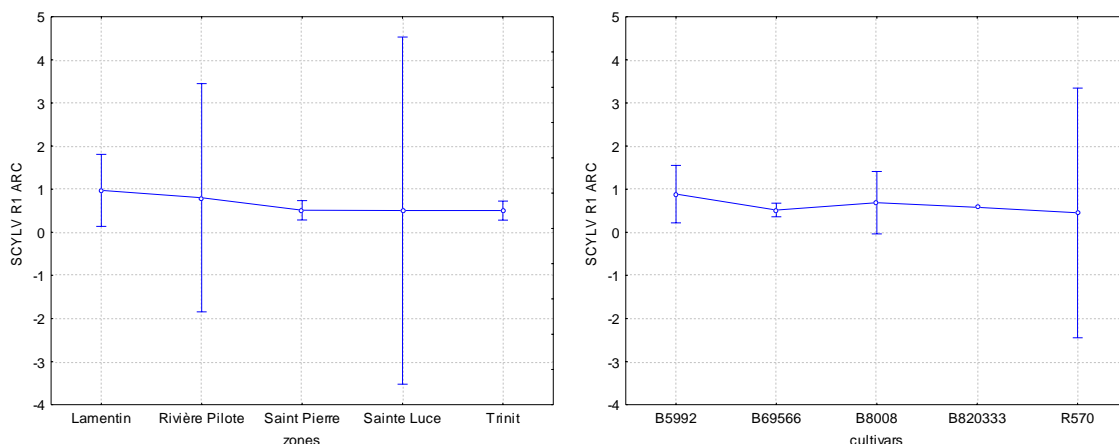


Figure 35 : Moyenne des contaminations par le SCYLV en repousse en Martinique et intervalles de confiance à 95% associés en fonction des cultivars (graphe de gauche) et des zones (graphe de droite).

Tableau 6. Evolution du taux d'infection par le SCYLV entre la canne plantée (CP) la première repousse (R1) en fonction du cultivar et de la zone de Martinique.

cultivar	zone	taux d'infection CP ¹	taux d'infection R1 ¹
B5992 (2)	Lamentin	82,13 ± 1,91 ²	97,75 ± 0,35 ²
B5992 (2)	Sainte Luce	19,39 ± 18,86	28,47 ± 34,68
B5992 (1)	Trinité	16,50	30,77
B69566 (2)	Lamentin	30,67 ± 17,09	25,91 ± 14,19
B69566 (3)	Saint Pierre	40,63 ± 10,17	23,83 ± 1,47
B8008 (2)	Rivière Pilote	17,75 ± 14,90	51,56 ± 28,04
B8008 (1)	Trinité	15,50	19,00
B82333 (1)	Trinité	9,00	30,23
R570 (2)	Trinité	7,17 ± 7,62	22,04 ± 23,85

¹ moyenne des proportions de plants positifs par Immuno-empreinte pour les parcelles d'un même cultivar dans une même zone. Les moyennes tiennent compte uniquement des parcelles échantillonnées en CP et en R1.

² Intervalle de confiance de sécurité 95%.

2-2-2-3- Répartition des géotypes du SCYLV en Martinique en canne plantée

Le géotype BRA-PER a été détecté dans tous les cultivars et dans tous les bassins canniers de Martinique (Tableau 7). Le géotype REU a été détecté à Trinité dans les cultivars B8008 et R570. Le géotype CUB n'a pas été détecté dans les échantillons prélevés lors de cette étude. Une feuille du cultivar B8008 et une du cultivar R570 à Trinité, parmi les 220 prélevées en vue du géotypage, présentaient à la fois le géotype REU et le géotype BRA-PER (Tableau 7).

Tableau 7. Nombre de feuilles positives par Immuno-empreinte infectées par les génotypes du SCYLV en Martinique.

cultivar	zone	nombre d'échantillons	BRA	CUB	REU	BRA + REU
B5992	Lamentin	40	40	0	0	0
B5992	Trinité	20	20	0	0	0
B5992	Sainte-Luce	23	23	0	0	0
B69566	Lamentin	40	40	0	0	0
B8008	Rivière Pilote	40	40	0	0	0
B8008	Trinité	16	14	0	1	1
B82033	Trinité	13	13	0	0	0
R570	Trinité	28	27	0	0	1
		220	217	0	1	2

2-2-3-Incidence du SCYLV en Guadeloupe et Martinique

L'objet de cette sous partie est de comparer les résultats des cultivars B69566, B5992 et R570 cultivés sur les deux îles.

2-2-3-1-Analyse statistiques sur la répartition et l'incidence du SCYLV

Les données de contamination par le SCYLV sont supposées proches d'une distribution normale après transformation arc sinus des proportions de plants infectés par le SCYLV.

Les taux d'infection sont significativement influencés par l'île ($p=0,000$) et par le cultivar ($p=0,008$). Il y a une interaction significative entre l'île et le cultivar ($p=0,047$), ce qui signifie que le comportement des cultivars n'est pas le même sur les deux îles (Annexe 11, Tableau 11-1).

Les cultivars B5992 et B69566 ont un comportement significativement différent en Guadeloupe ($p=0,006$) et en Martinique ($p=0,000$) (Annexe 11, Tableau 11-5).

En effet, le cultivar le plus infecté sur les deux îles est B5992, mais dans des proportions différentes : 10% en Guadeloupe pour les deux cycles de culture contre 44 et 57% en Martinique (Tableau 10). Le cultivar B96566 est infecté à près de 0% en Guadeloupe alors qu'il est infecté à plus de 30% en Martinique (Tableau 10).

Il n'y a pas de différence significative entre le cultivar R570 en Guadeloupe ou en Martinique ($p=0,411$, Annexe 11 : Tableau 11-6), ce cultivar est peu infecté sur les deux îles.

Du point de vue de l'impact du vecteur. Il n'y a pas d'influence de l'île ($p=0,465$) ni du cultivar ($p=0,317$) sur la présence du vecteur (Annexe 11 : Tableau 11-2). Il n'y a pas de différence significative ($p=0,334$) de comportement du vecteur vis-à-vis d'un cultivar entre la Guadeloupe et la Martinique (Annexe 11 : Tableau 11-2).

Tableau 8. Proportion de plants infectés par le SCYLV (en pourcentage) en fonction des cultivars, du lieu de prélèvement (Guadeloupe ou Martinique) et du cycle de culture (canne plantée CP ou première repousse R1).

	Martinique		Guadeloupe	
	CP±IC	R1±IC	CP±IC	R1±IC
B5992	43,91 ¹ ± 28,40 ²	56,64 ± 32,53	2,42 ± 0,06	9,25 ± 1,04
B69566	37,31 ± 9,62	24,52 ± 4,89	0,13 ± 0,14	0,50 ± 0,00
R570	7,17 ± 7,62	22,04 ± 23,85	2,33 ± 0,52	6,67 ± 3,24

¹moyenne des proportions pour l'ensemble des parcelles d'un cultivar en Guadeloupe et en Martinique.

²intervalle de confiance (IC) de sécurité 95%.

2-2-3-2-Génotypes

Le génotype dominant en Guadeloupe et en Martinique n'est pas le même (Figure 36). En effet, le génotype BRA-PER est le plus fréquent en Martinique alors qu'en Guadeloupe c'est le génotype REU.

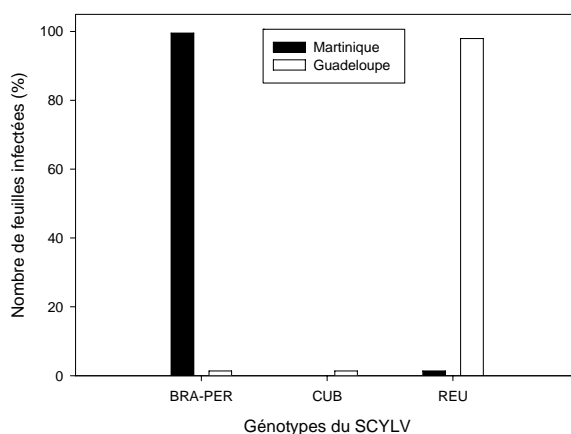


Figure 36. Prédominance des génotypes du SCYLV en Martinique et en Guadeloupe. Les barres représentent le pourcentage de feuilles infectées par les génotypes du SCYLV.

2-3-Conclusion et discussion

Bien que la présence du SCYLV ait été diagnostiquée en 1996 (Daugrois *et al.*, 1999) et que le vecteur principal de la maladie, *M. sacchari* avait été observé plusieurs fois sur les parcelles expérimentales du CIRAD (Daugrois *et al.*, 1999), cette étude est la première concernant la répartition du SCYLV et de son vecteur en Guadeloupe et en Martinique.

Les populations de pucerons observées variaient beaucoup entre parcelles et entre cultivars. Par exemple, les parcelles de R570 et R579 les plus infectées par le SCYLV en Guadeloupe étaient les moins colonisées par le vecteur. Il en est de même en Martinique. Aucun lien entre ces populations observées et l'incidence du SCYLV n'a pu être établi. Ceci n'est pas étonnant puisque les populations d'aphides sont régulées par de nombreux prédateurs (Dixon, 1998).

Une observation ponctuelle de ces populations durant un cycle de culture n'est pas suffisante pour tirer des conclusions sur l'éventuelle influence des populations de pucerons sur la dissémination de la maladie.

L'incidence du SCYLV variait entre les cultivars et entre les zones géographiques de Guadeloupe et de Martinique. De même, à la Réunion, le pourcentage de tiges infectées variait en fonction du cultivar et de la zone de prélèvement (Rassaby *et al.*, 1999). En Inde également, l'incidence de la maladie basée sur l'observation des symptômes, variait en fonction des cultivars et de la zone d'observation (Viswanathan, 2002). Il y a donc des variations dues à l'environnement et aux cultivars dans un environnement donné.

Globalement, l'incidence du SCYLV est beaucoup plus élevée en Martinique qu'en Guadeloupe. Par exemple, l'incidence du SCYLV à Marie-Galante était proche de zéro pour les trois cultivars échantillonnés (B69566, B80689 et R570) alors que deux de ces cultivars sont infectés en Guadeloupe continentale (7% pour R570 en OGT et 18% pour B80689 en CEGT). L'incidence du SCYLV pour le cultivar B69566 était proche de zéro quelque soit le cycle de culture et la zone échantillonnée en Guadeloupe, bien que les populations de pucerons observées soient importantes. Par contre, ce même cultivar présente des taux d'infection bien plus élevés (20 à 50%) en Martinique. Les taux d'infection du cultivar R570 en Guadeloupe et en Martinique suggèrent que ce cultivar serait le moins sensible de tous les cultivars échantillonnés pour cette étude. En effet, dans deux contextes épidémiques caractérisés par des pressions parasitaires très différentes, ce cultivar demeure peu infecté. Etant donné que les cultivars ne sont pas représentés dans toutes les zones géographiques, il est difficile de conclure sur les différences entre cultivars et entre zones. A la Réunion, les

cultivars R570 et R579 étaient infectés à 50 et 52% respectivement (Rassaby *et al.*, 2004). Ces cultivars sont beaucoup plus infectés à la Réunion qu'en Guadeloupe et en Martinique, ce qui laisse supposer une introduction plus tardive du virus en Guadeloupe et Martinique.

Au regard des différences observées entre certaines zones géographiques lors de l'état des lieux, il apparaissait comme incontournable de vérifier l'influence de l'insecte vecteur dans la contamination par le SCYLV. En effet, Les taux d'infection par le SCYLV observés à Marie-Galante pouvaient suggérer que les populations de vecteur présentes à Marie-Galante étaient incapables de transmettre le SCYLV ou qu'elles étaient moins efficaces à le transmettre. Tout comme il était également possible, dans le cas où le vecteur transmettrait avec la même efficacité, que l'inoculum soit présent en très faible quantité et par conséquent pas encore répandu. L'étude de la transmission du SCYLV via deux populations de *M. sacchari* nous permettait donc d'approfondir l'influence du vecteur. Cependant, lors de cette étude, les populations de vecteur de Marie-Galante et de Guadeloupe ont transmis le SCYLV avec la même efficacité. En effet, bien que l'efficacité de transmission n'était pas la même d'un essai à l'autre, les populations de Marie-Galante ont transmis ce virus avec le même taux de réussite que les populations de la Guadeloupe continentale pour chaque essai pris individuellement. Il est, par conséquent, improbable que les très faibles taux de contamination par le SCYLV observés à Marie-Galante durant cette étude soient dus à une moindre capacité du vecteur de Marie-Galante à transmettre le SCYLV. Ces résultats vont dans le sens de Gray et Gildow (2003), qui pensent que la spécificité du vecteur est liée à l'isolat de virus et non à des différences entre populations de vecteurs. Cependant, vu les taux très faibles voire nuls de contamination des parcelles de Marie-Galante par le SCYLV, elles n'ont donc pas été sélectionnées pour la recherche des géotypes du SCYLV. Il est donc impossible de savoir quel géotype est présent à Marie-Galante et si ce géotype joue un rôle dans la non contamination des cultivars.

Par contre, il est bien plus probable que le SCYLV ait été introduit à Marie-Galante récemment et qu'il ne se soit pas encore répandu sur l'île si le milieu (environnement, climat, méthode de culture, prédateurs,...) n'est pas propice à la prolifération des aphides. En effet, la maladie de la feuille jaune a pu être introduite par des pucerons ailés porteurs du SCYLV. Ce virus a également pu être introduit sur l'île de Marie-Galante par le transport de boutures issues de tiges infectées. Or, l'île de Marie-Galante applique le schéma de pépinière. Les boutures de leurs pré-pépinières sont issues des pépinières mères du CIRAD. D'autre part, les cultivars B80689 et R579 sont les plus récents sur l'île. Il est donc possible que même plus sensibles que B69566, ces cultivars n'aient pas encore été contaminés. Tout ceci porte

à croire que la situation de l'île au regard de la maladie des feuilles jaunes pourrait évoluer dans les prochaines années.

Des différences dans la capacité d'infection ou dans la virulence des différents génotypes du SCYLV ont été démontrées (Abu Ahmad *et al.*, 2007a). Or, la Guadeloupe et la Martinique s'opposent également par les génotypes du SCYLV qui prédominent sur ces deux îles. Cette différence pourrait avoir un rôle dans les variations d'incidences du SCYLV entre les deux départements. En effet, le génotype BRA-PER qui est l'un des plus virulents, est le plus répandu en Martinique. Alors qu'en Guadeloupe, c'est le génotype REU, le moins agressif et le moins virulent, qui est le plus fréquent. Il est possible que cette différence soit due à l'historique d'arrivée des génotypes dans la caraïbes et mais également à des origines et des modes d'importations de matériel végétal différents entre les deux îles. Il est également possible que les populations de vecteur de Martinique transmettent avec plus d'efficacité le génotype BRA-PER que celles de Guadeloupe, ce qui expliquerait la prévalence du génotype BRA-PER sur REU en Martinique. Il n'était pas possible de réaliser dans les temps, des tests de transmission avec les populations de Martinique en Guadeloupe pour des questions de logistique. Par contre, nous avons effectués des prélèvements de pucerons dans le but de procéder à des analyses génétiques de ces populations par la suite.

Seule l'industrie de la Guadeloupe possède un schéma de pépinière basé sur la production *in vitro* de plants sains. Ce schéma de pépinière peut influencer sur l'incidence du SCYLV en Guadeloupe en maintenant l'infection à des taux faibles, comme cela a été rapporté en Floride (Flynn *et al.*, 2005). Cet ensemble de paramètres pourrait expliquer le fait que les contaminations soient plus faibles en Guadeloupe qu'en Martinique.

En Guadeloupe, les contaminations observées en premier cycle de culture peuvent être dues à la plantation de boutures infectées ou à une transmission par des pucerons virulifères. L'absence de différence significative d'infection entre les quadrats d'échantillonnage des parcelles suggère que les taux d'infection en canne plantée ne seraient pas uniquement dus à la transmission par le vecteur, mais également à la plantation de boutures infectées. Les études précédentes en Guadeloupe ont montré que les bordures d'une parcelle saine à la plantation étaient plus colonisées par les pucerons ailés et plus contaminées par le SCYLV (Edon *et al.*, 2006). Par contre, dans l'étude présente, l'augmentation du taux d'infection d'une parcelle d'un cycle de culture à l'autre ne peut être que le résultat de la transmission par le vecteur puisqu'il n'y a pas de replantation.

La diminution du taux d'infection entre deux étapes du schéma de pépinière pour les cultivars B5992 et R570 laisse supposer une forme de résistance de la plante telle que la

limitation de la circulation du SCYLV, ce qui limiterait également la dissémination du virus par les boutures. Aucune étude ne permet de confirmer cette hypothèse. D'un autre côté, 40 à 60% des tiges des pré-pépinières sont utilisés pour planter les parcelles du stade suivant. Ceci peut également induire une variation du taux d'infection selon l'état sanitaire des tiges utilisées pour les boutures.

De même, en Martinique, le cultivar B69566 présente des diminutions significatives des taux d'infection d'un cycle de culture à l'autre. L'échantillon de feuilles prélevé pour le diagnostic en canne plantée et en repousse étant représentatif, la baisse d'infection observée peut être due à une résistance de la plante au virus comme nous l'avons énoncé précédemment. Il est également possible que le virus ait disparu ou qu'il soit maintenu à un seuil non décelable par immuno-empreinte. Ce mécanisme de résistance pourrait être lié à la disposition des faisceaux infectés par le SCYLV. En effet, lors de diagnostic par Immuno-Empreinte de tiges pour le SCYLV et pour d'autres agents pathogène, nous avons pu constater la distribution des faisceaux infectés n'était pas la même selon les cultivars. Il est possible que le bourgeon soit situé dans une zone où les faisceaux ne contiennent pas de particules virales, et par conséquent, que la nouvelle plante formée ne contienne pas de particules virales. Il est également possible que même si les faisceaux à proximité du bourgeon contiennent des particules virales, que ces dernières ne passent pas par le bourgeon, par des mécanismes qui nous sont inconnus pour le moment.

PARTIE 3/CONTAMINATION DE PLANTS SAINS DE CANNE A SUCRE AU CHAMP PAR LE SCYLV

1-INTRODUCTION ET SYNTHÈSE DE L'ARTICLE:

Les travaux qui font l'objet de ce chapitre sont présentés ci-après sous la forme d'un article qui a soumettre à une revue de biométrie. Les quelques lignes qui suivent, visent à résumer et introduire cet article.

La canne à sucre est généralement multipliée par bouturage, de plus, les plantations pérennes durent cinq à dix ans, mais le cycle de récolte est annuel. Ces conditions de culture sont favorables au développement de maladies fongiques, bactériennes et virales. Dans ce contexte agro-économique, l'orientation de la lutte contre ces maladies se porte vers la résistance variétale, accompagnée d'un système d'assainissement sans utilisation de pesticide. En effet, le schéma de pépinière mis en place fournit des plants sains à la production cannière.

La maladie de la feuille jaune est une maladie vectorielle émergente pouvant induire des pertes de rendements variables. L'analyse des risques sur la dissémination du pathogène, sa diversité, sa virulence et l'évolution de ses populations, ainsi que le comportement de la plante, est donc importante pour la production cannière. Un moyen d'étudier la dissémination du virus est d'analyser sa transmission spatio-temporelle.

Plusieurs études traitent de la dissémination spatio-temporelle de virus transmis à différentes cultures par l'intermédiaire de leur vecteur. Les méthodes statistiques utilisées par les différents groupes de recherche sont variées.

En effet, Gibson (1997) a décrit un modèle stochastique permettant de mettre en évidence le rôle de la transmission du Citrus tristeza virus (CTV) par le vecteur *Aphis gossypii* au sein d'une même parcelle et entre parcelles dans la dissémination du CTV.

Gottwald *et al.* (1999) ont également décrit un modèle stochastique spatio-temporel, mais en utilisant les méthodes d'intégration stochastique dites « Monte Carlo par chaînes de Markov ». Ils ont démontré qu'en fonction du vecteur impliqué dans la dissémination du Citrus tristeza virus (CTV), la maladie pouvait être transmise sur de courtes distances sans infection primaire.

Smith *et al.* (2000) ont étudié la dissémination du Maize streak virus (MSV) en utilisant une méthode combinant les analyses de classes de distances et la distribution selon la loi bêta-binômiale afin d'analyser l'agrégation des plantes infectées. Selon eux, l'augmentation de

l'agrégation à la fin de la saison était le résultat du comportement du vecteur ainsi qu'à d'autres paramètres moins importants.

Fondong *et al.* (2002) ont analysé la dissémination spatio-temporelle du cassava mosaic virus (CMV) et des populations de vecteur de ce virus. Ils ont utilisé l'analyse de variance factorielle afin de caractériser l'impact de la maladie.

Pethybridge et Madden (2003) ont développé un modèle permettant de décrire la dissémination spatio-temporelle de trois virus. Ils ont comparé la dispersion du *Hop latent virus* (HpLV), du *Hop mosaic virus* (HpMV), et du *Apple mosaic virus* (ApMV) dans les plantations de houblon afin d'identifier les principaux mécanismes contribuant à la transmission de ces trois virus. Ils ont différencié la transmission à partir de sources extérieures à la parcelle d'une transmission locale due au vecteur ou à des opérations mécaniques. Le modèle stochastique spatio-temporel qu'ils ont utilisé était basé sur les méthodes de MCMC proposées par Gibson (1997) et sur des analyses de réseau de voisinage.

En épidémiologie des maladies transmises par des insectes, la dissémination de la maladie est généralement de type infection primaire, de type infection secondaire ou une combinaison des deux types d'infection. Le terme d'infection primaire désigne l'infection à partir d'inoculum présents à l'extérieur de la parcelle. La répartition spatiale des plants infectés sur la parcelle est généralement aléatoire. Le terme d'infection secondaire désigne l'infection due à une transmission à l'intérieur de la parcelle, c'est-à-dire à partir de plants infectés présents sur la parcelle.

Les données disponibles sur l'épidémiologie du SCYLV concernent la capacité de transmission des aphides, mais peu d'informations sur la dissémination spatiale de la maladie et sur le rôle des *Aphididae* dans cette dissémination sont disponibles.

Dans ce contexte, sachant que la maladie de la feuille jaune est une maladie vectorielle émergente, et vu que l'incidence du SCYLV sur les plantations de canne à sucre augmentera probablement dans les prochaines années, il était important de comprendre et modéliser la dissémination du SCYLV par son vecteur.

Le but de cette étude était donc de décrire l'évolution spatio-temporelle de la maladie de la feuille jaune en tenant compte de la dynamique des populations d'*Aphididae* et des plantes infectées par le SCYLV afin de proposer un modèle généralisant celui présenté par Gibson et Austin (1996). Ce modèle serait un outil de prédiction et de description de la dissémination du SCYLV.

Pour cela, nous avons mis en place un essai à partir de plants sains d'une variété de canne à sucre sensible au SCYLV, issus de *c.i.v.* Nous avons régulièrement effectué un diagnostic quant à la présence du virus par Immuno-empreinte pour tous les plants de la parcelle

pendant plusieurs mois. Nous avons obtenu des cartes d'infection montrant l'état sanitaire de la parcelle à chacune des dates d'échantillonnage.

Parallèlement, nous avons noté la présence ou l'absence du vecteur sur tous les plants de la parcelle et procédé à des dénombrements de population sur un nombre fixe de plants.

En collaboration étroite avec Olivier Jacquet, doctorant en mathématiques appliquées de l'équipe GRIMAAG de l'UAG, nous avons effectué des analyses statistiques spatiales et spatio-temporelles visant à déterminer le type de répartition des plantes infectées par le SCYLV. Pour l'analyse spatiale nous avons utilisé l'indice de dispersion qui indique le degré de fluctuation de la répartition des infections par rapport à une répartition complètement aléatoire, l'indice de Moran qui mesure le degré autocorrélation spatiale et les analyses de réseaux de voisinage qui compare la distribution spatiale des plants infectés voisins à celle d'une distribution complètement aléatoire.

Pour l'analyse spatio-temporelle, nous avons utilisé un indice d'auto-corrélation spatio-temporelle qui mesure le degré de similarité des plants voisins dans le temps et l'espace.

Ces analyses spatio-temporelles nous ont permis de distinguer deux phases dans la contamination d'une parcelle saine à la plantation. Lors de la première phase, les infections sont aléatoires et probablement dues à des ailés venants de l'extérieur de la parcelle. Lors de la deuxième phase, après fermeture du couvert végétal, les infections se font de proche en proche à partir des infections primaires.

A partir des résultats obtenus, et en nous inspirant du modèle de Gibson et Austin (1996), nous avons décidé de modéliser la dissémination du SCYLV sur une parcelle saine à la plantation. Notre modèle tient compte des deux phases décrites ci-dessus. La première phase est représentée par une courbe de type exponentielle dont la pente faible reflète l'infection primaire. La deuxième phase est également représentée par une courbe de type exponentielle, mais de pente plus forte, représentant ainsi l'augmentation des infections dues aux contaminations de proche en proche.

Aspects mathématiques

La méthode utilisée par Gibson et Austin (1996) est basée sur la probabilité d'infection par un virus ; le but est d'ajuster les modèles stochastiques spatio-temporels à la dissémination d'une maladie de plante.

Les deux modèles considérés par Gibson et Austin considèrent comme variable les individus d'une population qui occupent des positions discrètes sur une grille en deux dimensions.

La maladie est caractérisée par la présence ou l'absence. L'infection d'individus sensibles par des individus infectés suit un processus stochastique.

La méthode décrite peut-être appliquée à des paramètres estimés pour ce genre de modèles.

Gibson et Austin (1996) comparent et ajustent deux modèles différant dans la relation entre la distance et la pression du CTV. Ils ont montré qu'un modèle suivant la loi de puissance est plus adapté qu'un modèle suivant une loi exponentielle négative.

Le modèle stochastique décrit par Gibson et Austin s'intéresse à une maladie virale des orangers disséminée par des *Aphididae*. La population d'arbres est représentée par une grille rectangulaire L avec des positions discrètes.

A l'instant t , un individu occupant une position x peut être sensible, on note $D_t(x)=0$ ou il peut être infecté, on note $D_t(x)=1$. Les stades latents ne sont pas représentés dans ces modèles. $D_x(t)$ est l'état sanitaire à la date t de l'individu en x .

Le changement d'état d'un individu sensible en individu infecté est traité comme un processus stochastique. Si à l'instant t , x appartient à la grille et est sensible et y appartient à la grille, est infecté et par conséquent une source d'infection pour x , alors pour un espace de temps dt très petit, la probabilité que y infecte x entre t et $t+dt$ est $P = k(t)F_\alpha(y-x)dt$. F_α est la relation entre la capacité infectieuse liée au vecteur et la position relative entre individus infectés et individus sensibles. $k(t)$ est le taux d'infection sous-jacent, il doit être positif et varie en fonction de t .

Pour le premier modèle, la pression infectieuse diminue exponentiellement avec la distance euclidienne. $F_\alpha(y-x) = \exp(-\alpha|y-x|)$.

Pour le deuxième modèle, la pression infectieuse est inversement proportionnelle à une puissance de la distance. $F_\alpha(y-x) = |y-x|^{-2\alpha}$.

Ces deux modèles sont déterminés par un même paramètre non négatif α . $\alpha=0$, représente pour les deux modèles d'une répartition homogène (sans agrégat) des individus infectés et sensibles. Ce qui correspond à une dissémination sans caractéristique spatiale. α très grand représente pour les deux modèles une dissémination où la transmission a lieu via des interactions entre plantes de positions voisines. La distribution du premier modèle suit une loi exponentielle contrairement à celle du deuxième modèle.

Afin d'ajuster et estimer les paramètres, on pose S_0 l'ensemble des plantes infectées la première année et S_1 l'ensemble des plantes infectées la deuxième année. $S_1 \setminus S_0$ représente l'ensemble $\{x_1, \dots, x_N\}$ des nouvelles infections, avec N le nombre total d'individus infectés. $L \setminus S_1$ représente les individus non infectés.

Pour un modèle stochastique donné, on note $t_\alpha(x)$ la variable aléatoire exprimant le temps que met un individu x à devenir infecté quand le stade initial de la maladie est S_0 et que le paramètre du modèle est α .

Posons $G(\alpha) = P(t_\alpha(x) < t_\alpha(y))$ pour tout $x \in S_1 \setminus S_0$ et $y \in L \setminus S_1$.

$$G(\alpha) = \sum_{\omega} P(t_\alpha(x_\omega(1)) < t_\alpha(x_\omega(2)) < \dots < t_\alpha(x_\omega(N)) < \min\{t_\alpha(y) \mid y \in L \setminus S_1\})$$

$$G(\alpha) = \sum_{\omega} P_{\omega}$$

$G(\alpha)$ est la probabilité que tous les points de $S_1 \setminus S_0$ soient infectés avant les points de $L \setminus S_1$. Par conséquent, $G(\alpha)$ peut être utilisé pour la Statistique Inférentielle portant sur la valeur α . Dans un premier temps, $k(t)$ peut être ignoré ce qui simplifie l'analyse.

Soit ω un ordre choisi au hasard avec une probabilité $g(\omega)$, alors $G(\alpha) = E\left(\frac{P_{\omega}}{g(\omega)}\right)$. $G(\alpha)$

peut donc être estimé en faisant la moyenne des P_{ω} sur un grand nombre de simulations d'ordre ω .

On obtient un estimateur de $G(\alpha)$ noté $\hat{G}(\alpha)$ qui peut être utilisé pour déduire des informations concernant le paramètre α .

$$\text{Pour } a \in [0, +\infty[, \hat{p}(\alpha) = \frac{\hat{G}(\alpha)}{\int_0^{+\infty} \hat{G}(\alpha) d\alpha}.$$

Cette technique peut être facilement adaptée au cas où il y a plusieurs dates d'observation. Pour cela, il faut estimer la probabilité comme ci-dessus pour chaque transition et multiplier les estimateurs entre eux. Cette technique peut également être appliquée, après quelques modifications, à d'autres modèles de dissémination spatiale, comme par exemple ceux basés sur des interactions de voisinage.

2-PUBLICATION : Modeling spatio-temporal epidemic spread of *Sugarcane Yellow Leaf Virus* using point processes

Edon-Jock C.^{1,2}, Jacquet O.², Vaillant J.², Daugrois J.-H¹.

¹*UPR 75 Amélioration génétique d'espèces à multiplication végétative, CIRAD Département des Cultures annuelles, Station de Roujol, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe F.W.I.*

²*Département de Mathématiques et Informatique, UFR Sciences Exactes et Naturelles, Campus de Fouillole, 97159 Pointe-à-Pitre, Guadeloupe F.W.I.*

Corresponding author: Daugrois J-H, e-mail address: jean-heinrich.daugrois@cirad.fr

ABSTRACT

Edon-Jock C., Jacquet O., Vaillant J., Daugrois J.-H. Modeling spatio-temporal epidemic spread of *Sugarcane Yellow Leaf Virus* using point processes. To submitter.

The Sugarcane yellow leaf virus is the causal agent of Yellow leaf disease causing economic losses on sugarcane plantations. SCYLV is spread by aphids and infected stalks. As disease free nursery schemes are often used for seed cane production, understanding and evaluating epidemic risk due to yellow leaf spread by aphid is an important feature for sugarcane production. A study of this epidemic was realized both by a sampling survey of vector population and plant infection. A disease free plantation of a susceptible cultivar was completely observed spatially at different dates. This survey permits us to characterize virus spread from outside field sources and from inside field sources: in the first phase, infection appears to be completely random, and in the second phase, spreads locally from one plant to another. This study allowed us to propose a model as a tool for describing and forecasting the SCYLV spread by *Melanaphis sacchari*.

Additional key words: stochastic models - epidemiology

INTRODUCTION

Yellow leaf disease is a recent, important and widely spread disease of sugarcane, causing severe yield losses on susceptible cultivars (27, 41). The most characteristic symptom is yellowing of the midrib of sugarcane leaves, but the midrib coloration can also turn to pink. These symptoms are not specific to yellow leaf and can be caused by various biotic and abiotic stresses (27, 37, 41). The disease is caused by Sugarcane Yellow Leaf Virus of the genus *Polerovirus* of the family *Luteoviridae* (8). This virus is transmitted from plant to plant only by aphids in a persistent, circulative and non replicative manner. The virus particles are ingested with the sap when aphids feed on infected leaves (21). Aphid species *Ceratovacuna lanigera* (43), *Melanaphis sacchari*, *Rhopalosiphum maidis*, and *R. rufiabdominalis* are known to be vectors of SCYLV (36). *M. sacchari* has been demonstrated to be the most efficient aphid vector of SCYLV compared to *R. maidis*, and *R. rufiabdominalis* (36), and to date has been the only SCYLV vector found in sugarcane fields in Guadeloupe (12).

Numerous studies concerned the identification and characterization of the causal agent of sugarcane yellow leaf (26, 29, 34, 41), the impact of yellow leaf on sugarcane yields (6, 32, 41); the genetic diversity of SCYLV (1); the SCYLV transmission (2, 36, 43) and the variation in pathogenicity of SCYLV (2). On the other hand, the epidemic of the SCYLV was only based on the transmission capacity of aphids, but more studies are needed on the spatial spread of the disease and on the role of the aphid in the disease spread. Only some information is given on the proximity of SCYLV infection by aphids, but without taking into account aphids population dynamics (25).

SCYLV was first identified in Guadeloupe in 1996. The introduction of this virus probably occurred when importing cultivars from other countries to Guadeloupe. Actually, SCYLV is present in all growing areas and in all cultivars in Guadeloupe, but with variable prevalence (12). Several methods for yellow leaf disease control have been used since the identification of the SCYLV. In Guadeloupe, the most common is the tissue culture of disease free plantlets of sugarcane (13). Nevertheless, disease free plants may be quickly infected when transferred to the field. Another alternative is the culture of resistant varieties to the vector, the virus or to the replication of the virus in the plant. In Guadeloupe, present commercial cultivars were selected without yellow leaf disease pressure. Even if infection rate is actually relatively low (0% to 21%), disease may increase and cause damages to sugarcane producers in Guadeloupe. Guadeloupe sugarcane growing areas cover around 40% of the farmland. Moreover, sugarcane is a structuring element of Guadeloupe economy and tourism:

the industry produces sugar, alcohol and energy for local consumption. The main production of sugar and a part of alcohol production are exported to France.

As Yellow Leaf incidence may increase and because disease free tissue cultured plants are used for sanitary control in Guadeloupe, understanding and modeling SCYLV spread by its vector in a disease free plot may help for the determination of fighting strategies against the virus.

Virus disease epidemiology is not well documented. However, spatiotemporal spread of virus transmitted by vectors has been studied for several crops with different statistical methods.

Gibson (18) described a stochastic model and showed implication of “intra and inter transmission” in the spread of *Citrus tristeza virus* (CTV) and which transmission mode was predominant.

Gottwald *et al.* (20) described a spatiotemporal stochastic model using Monte Carlo Markov Chain (MCMC) stochastic integration methods to identify the biological processes that occurs in CTV spread. According to the vector involved in CTV spread, the disease could be transmitted on short distances without background infection.

Smith *et al.* (38) investigated the spread of *Maize streak virus* (MSV) using both distance class analysis and the beta-binomial distribution to analyse spatial aggregation of diseased plants. They supposed that the increasing aggregation observed at the end of the season was due to the behaviour of the vector and other less important factors.

Fondong *et al.* (15) analysed spatial and temporal spread of cassava mosaic virus and populations of the whitefly vector. They used factorial analysis of variance to characterise disease influence.

Pethybridge and Madden (30) developed a model for describing spatiotemporal dynamics of three viruses spread in Hop garden. They compared the spread of *Hop latent virus* (HpLV), *Hop mosaic virus* (HpMV), and *Apple mosaic virus* (ApMV) on Hop, in order to identify the main mechanisms contributing to transmission of these three viruses. They differentiated spread from outside the garden and local spread due to aphid vector or mechanical operations using the parameters for primary and secondary infection of the model. The spatiotemporal stochastic model they used was based on (MCMC) method of Gibson (18) combined with join-count analyses.

It is generally admitted that spread of diseases transmitted by insect vectors consists in either primary infection and secondary infection or both. The primary infection originates from inoculum sources present out of the plot. It can also be called background infection and

distribution of the infected plants in the plot is generally random. However, the secondary infection is due to local transmission because the inoculum sources are infected plants in the plot (18, 20, 30).

Then, the aim of this study was to describe spatiotemporal yellow leaf disease epidemic taking into account aphid population dynamics and plant infection by SCYLV and to propose a model generalizing the one presented by Gibson and Austin (17) as a tool for describing and forecasting the SCYLV spread.

MATERIALS AND METHODS

Plant material. All experiments were conducted with disease-free tissue cultured plantlets of cultivar SP71-6163, susceptible to yellow leaf disease (41). Absence of SCYLV virus particles in these plants was controlled by RT-PCR as described by Comstock *et al.* (5). Plants were propagated in vitro and transferred to the greenhouse (13). Four-week-old greenhouse plants were used for field experiment.

Aphid material. Aphid vector *M. sacchari* was not introduced on the plot. Alate aphids arrived naturally and colonized the field.

Experimental plot. The field experiment was set up at the CIRAD experimental station at Petit-Bourg, Guadeloupe F.W.I. The plot was established with 1,643 virus-free plants of cultivar SP71-6163. The plants were disposed in 17 rows with inter-row spacing of 1.5m. Each row contained 95 plants spaced by 0.5m. Plants were fertilized at the time of planting and irrigated during the first three months.

Round of 100 plants were planted on the east edge of the plot, in case of plant mortality. Few plants died, so we didn't replace any plant in the plot.

Serological assays for SCYLV. SCYLV was detected in leaf samples by TBIA as described by Schenck *et al.* (35) with few modifications. The last unrolled leaf of each plant of the trial was collected. Midrib sections of leaves were blotted for two seconds on Schleicher & Schuell OPTICRAN BAS 85 0.45µm reinforced nitrocellulose membranes. The membranes were blocked with 3% bovine albumin (SIGMA) diluted in TBS-Tween (2.42g/L of TRIS, 8g/L of NaCl, 0.5mL/L of Tween) for 30 minutes. First incubation was processed with 1/10,000 anti-SCYLV AS-R2 IgG (kindly provided by Pr B.E.L. Lockhart) diluted in TBS-Tween for 90 minutes. The membranes were rinsed three times with TBS-Tween before the second incubation in 1/10,000 anti-rabbit IgG alkaline phosphatase conjugate antibody produced in goat (SIGMA) diluted in TBS-Tween for 75 minutes. After three rinses, FAST™

BCIP/NBT tablets (one tablet for 30ml) were used to identify infected phloem tissue. All processes were run at room temperature (25°C). Positive reactions (blue coloration) were determined using a stereomicroscope (x6.3) after wetting the nitrocellulose membranes with distilled water.

Determination of aphid populations. Presence of *M. sacchari* was assessed visually on leaves of all plants. A plant was considered as colonized by *M. sacchari* when at least one nymph, one winged aphid, or one apterous aphid was observed on a leaf.

Aphid population was estimated from 40 randomly chosen plants of the trial.

Data collection. Data collection began 5 weeks after planting. The number of SCYLV infected plants was determined each month by TBIA for all plants of the trial on weeks 6, 10, 14, 19 and 23 after transferring disease free plants to the field. In the same way, vector presence or absence was noted for each plant on weeks 5, 9, 13 and 18, and aphid population was estimated on weeks 5, 8, 11, 12, 15, 16, 18, 21 and 22.

Statistical Analyses.

Dispersion index tests. Monte Carlo statistical tests (3, 14) based on the index of dispersion (39) at several spatial scales of the observed plot were carried out. Each spatial scale corresponds to a quadrat size. For each observation date and each chosen spatial scale, the variance-mean ratio of the number of infected plants per quadrat was calculated for the observed distribution and the simulated distributions. Simulated distributions were obtained by random permutation of infected plants as described by Celini and Vaillant (3). The *p*-values were calculated from the rank of the observed dispersion index among the whole set of simulated and observed indexes.

Spatial autocorrelation index tests. Similarly, spatial autocorrelation was tested at several scales based on Moran index (3) with neighborhood effect defined from a given distance between plants or from the 4-next-neighbor quadrats.

Each *p*-value was calculated from the rank of the observed spatial Moran index among the whole set of simulated and observed indexes. In addition, spatial autocorrelation for infected plants were also analyzed under the join count test with neighborhood effect between infected plants as describe by Pethybridge *et al.* (30) except that the calculations were performed with SPDEP package developed for R.

Spatio-temporal autocorrelation index tests. A criterion based on the number of newly infected neighbors was calculated. This is a generalization of Moran index based on spatio-temporal neighborhood. Simulations based on random permutations of the newly infected plants between two consecutive dates were carried out and permitted us to verify whether or

not infections occurred from one date to another on locations which are spatially close to each other.

Spatial infection rate and surface fitting. The cubic spline method for surface fitting provides an interesting tool to detect spatial gradient or basin effect in an infected plot (42). The local smoothing provides estimates of local infection rates.

Cumulated infective capacity estimation. The cumulated infective capacity function is estimated through the Weibull cumulative distribution which involves two parameters α and β which can be estimated using regression techniques (4, 16) owing to the following relationship:

$$\text{Ln}[-\text{Ln}(1 - v_t)] = \beta \text{Ln}(t) - \beta \text{Ln}(\alpha)$$

where v_t is the cumulated proportion of vectors observed at time t .

Background infection parameter estimation. By applying moment techniques, a closed form estimator a^* of the background infection rate a can be calculated as follows:

$$a^* = -\frac{1}{H^*(\tau)} \text{Ln}(1 - p_\tau^*) \text{ where } H^*(\tau) \text{ is the estimated cumulated infective capacity at the}$$

phase of changing date τ and p_τ^* is the observed proportion of infected plants at date τ .

Local interaction parameter estimation. The local interaction parameter b is estimated with Monte Carlo procedures by using random permutations and Bayesian calculations (18, 28, 31). The mode of the posterior distribution of b provides the best Bayesian estimator of b .

All the calculations were programmed under R.

RESULTS

Determination of aphid populations. *M. sacchari* appeared rapidly in the sugarcane plot. Alate aphids were observed three days after transferring plants to the field. All plants in the plot were colonized at least once in 18 weeks by *M. sacchari*.

Detection of SCYLV. The first detection of SCYLV was made on week 6 when six leaves were diagnosed positive by TBIA. Then infection increased at each new date to reach 295 positive leave samples 23 weeks after transferring plants to the field.

Spatial dispersion of infected plants. The spatial dispersion of infected plants was analyzed with the dispersion and spatial autocorrelation tests on five spatial scales corresponding to different quadrat sizes. The dispersion indexes based on the number of SCYLV infected plants per quadrat were calculated for different dates (Table 1). The associated p-values

clearly indicate that an irregular dispersion of infected plants appears only from week 19. The hypothesis of completely random distribution of plant infections is rejected at week 19 for two spatial scales out of five, whereas it is rejected for all quadrature sizes analyzed at week 23. The spatial autocorrelation Moran indexes were calculated for the same spatial scales (Table 2). The results are very close to those obtained for the dispersion index. Autocorrelation was detected from week 19. Significant Moran indexes were obtained for two spatial scales at week 19 and for the three first spatial scales at week 23 indicating strong positive autocorrelation. This means that the numbers of infected plants in some neighboring quadrats are very similar. In addition to the dispersion index tests, this indicates spatial aggregation at weeks 19 and 23. The dispersion and the aggregation of spatial infection are illustrated by spatial surface fitting of infection rate (Fig. 1). The Spline fits for the spatial distribution of plant infections at weeks 19 and 23 showed a basin effect. The intensity of infection by SCYLV decreased from the edges to the center of the plot.

Spatial and spatio-temporal distribution of infected individual plants. The Moran indexes (MI) on the same statue value of neighboring plants were calculated for neighborhood distances up to 3 m (Fig. 2). The results indicate that the distribution of individual plants is not different from a random distribution for weeks 6, 10 and 14 (MI is close to 0). On the other hand, at weeks 19 and 23, the distribution of infected plants became aggregative (MI>0). The Moran indexes are significantly different from 0 at weeks 19 and 23 for all the distances analyzed with p-value below 10^{-4} . Moran indexes decrease when increasing neighborhood distance, which indicates short distance relationship between infected plants.

The results of the join count test on infected neighbors confirmed also aggregation of infected plants since the week 19 (Fig. 3). At weeks 6 and 10 the numbers of infected plants were not sufficient to include these sampling dates in the join count test analysis. At week 14, the observed statistics were close to the expected values, which indicate that the distribution of infected plants can be considered as random. At weeks 19 and 23, the observed statistics are significantly different from the expected values. These results indicate that there was a neighborhood effect between infected plants and that the distribution of infected plants at these sampling dates was not random. When increasing the neighborhood distance, the difference between the observed and the expected statistics do not increase, indicating as previously, a short distance relationship between the infected plants.

The short distance of the neighborhood effect is confirmed when using the join count test with defined distance between each individual infected plant and its infected neighbors (table 5).

The join count test analyses indicate a significant neighbor effects when the distance between plants ranges from 0.5 to 2 m. The neighbors situated above 2 m show a random distribution. The neighborhood effect was confirmed by analyzing the spatiotemporal autocorrelation when the number of newly infected neighbors between successive sample dates was calculated (Table 3). The space-time autocorrelation index obtained is very significant at weeks 19 and 23, and not before. As a matter of comparison, the calculation of frequencies of newly infected next neighbors for both virus-free and infected plants shows neighborhood contamination at week 19 and 23 (Table 4).

Stochastic modeling. Regarding the results described above, we propose a model generalizing the one presented by Gibson and Austin (17). This model consists of two phases: during the first phase, infections occur independently of each other mainly due to SCYLV transmission by alate aphids. In the second phase, there are local transmissions by apterous aphids which can move from one plant to another, as soon as the sugarcane plants reach a certain phenological stage, when leaves of neighboring plants touch each other.

Our model is defined by the so called stochastic intensity $\lambda(x,t)$ with $\lambda(x,t)dt$, the probability that plant x is infected between dates t and $t+dt$.

We wrote:

$$\lambda(x,t) = \left(a + I(t) \sum \exp(-b.d(x, x_k)) \right) h(t)$$

where a is the background infection parameter, b is the local interaction parameter, $I(t)=0$ if date t belongs to the first phase, $I(t)=1$ if date t belongs to the second phase, $h(t)$ is the infective capacity at date t and is modeled by means of the Weibull density. \sum indicates the sum over the whole set of infected plants x_k prior to date t .

Therefore, the cumulated infective capacity denoted by $H(t)$ is given by the Weibull cumulative distribution and verifies :

$$H(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right)$$

The parameters α and β can be estimated using the empirical cumulated frequencies of aphids and regression tools. Herein, the curves of infective capacity were calculated along with the cumulated frequencies of apterous and larva aphids, and those of alate aphids. Cumulative distributions were fitted with Weibull curves (Fig. 4). The equations of cumulated infective capacity curves give the estimated values for parameters α and β , respectively 2.6

and 15.3.

Estimation of the background infection: the proportion of SCYLV infected plants and the 95% confidence band and the expected proportion of infected plants under the hypothesis of completely random distribution of plant infections were plotted (Fig. 5). The hypothesis of completely random distribution of infected plant is not rejected until week 14 which is the last date observed before the plot closing. Then the background infection parameter was estimated with $\tau=14$.

The numerical estimation parameter a is obtained by using the following expression:

$$a^* = -\frac{1}{H^*(\tau)} \ln(1 - p_\tau^*)$$

$$\text{so that } a^* = -\frac{1}{0.548} \ln(1 - 0.041)$$

This leads to the estimate of the background infection parameter $a^*=0.077$. Afterwards, the observed proportions of infected plants at weeks 19 and 23 are much larger than the expected ones under this hypothesis of completely random distribution of infected plant.

Then, an estimate of parameter b , local interaction, is calculated with Monte Carlo procedures. In the same way, the proportion of SCYLV infected plants, the 95% confidence band and the expected proportion of infected plants under the hypothesis of local transmission of infection were plotted (Fig. 5). The hypothesis of local transmission of infection is not rejected since week 19. The estimate of the local interaction parameter is $b^*=1.1$. The cumulated proportion of infected plants predicted by the model is 0.041 just before the plot closing (week 14).

The expected proportion of infected plants is given by:

$$\text{for } t \leq \tau, E(p_t) = 1 - \exp(-aH(t))$$

$$\text{and for } t > \tau, E(p_t) = 1 - \exp(-aH(t) - c(t - \tau))$$

where c is a second phase parameter. If $c=0$, it means that the propagation remains in first phase. The greater c is the closer to 1 is p_t . The estimate $c^*=0.014$ is obtained numerically by generalized least square methods.

The prediction curves with the calculated parameters are:

$$\text{for } t \leq 14, p_t = 1 - \exp\left(-0.077\left(1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{9.7}\right)^{2.5}\right)\right)\right)$$

$$\text{and for } t \geq 14, p_t = 1 - \exp\left(-0.077\left(1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{15.3}\right)^{2.6}\right)\right) - 0.014(t - 14)\right)$$

After the plot closing, the predicted proportion is 0.178 at week 23 and 0.256 at week 30.

DISCUSSION

This study was carried out in a coordinated collaborative work between mathematicians and plant pathologists, which is not often the case (23). Mathematical models play an important role in contributing to a better understanding of spatio-temporal spread in epidemiology or ecology. There is a long history of spatio-temporal modeling (22). However the increase in computational facilities, like high performance computer clusters, has provided new numerical tools for analyzing spatio-temporal data. In that way we developed tools for spatio temporal modeling based on SCYLV sugarcane plant infection maps at different dates. The maps were built from diagnosis of SCYLV infection on each plant of the observed plot instead of visual examination for which absence of symptoms does not mean absence of SCYLV (27, 37, 41). Thus, the real infection situation was available in the entire plot.

We carried out statistical analyses on the spatiotemporal distribution of infected plants for the different observation dates before proposing a stochastic model of infection spread. The spatial and temporal distributions were studied by means of dispersion index tests, spatial and spatiotemporal autocorrelation tests. Results show the existence of two phases in the plant infection process according to the plant growth.

The first phase corresponds to the period where the sugarcane stalks were at their early phenological stage. The leaves of adjacent plant were not in contact, so that the apterous aphids could not move from one plant to another. We called this the “open plot phase“. During this first phase, the plants were infected by the alate vectors independently of each other. Moreover, since the apterous aphids do not move over the plot at this period, we may consider that this random infection is due to the alate aphids. In addition, when transferring to the field, the plants were SCYLV free. Then, the SCYLV infection detected at the beginning of the study was only due to external inoculum sources brought in the plot by alate aphids. When creating a neighborhood network and analyzing the link status of neighborhood plants with the Moran index and with the joint count test for infected-infected link, we observed that

the distribution of the infected plants was not significantly different from a random distribution at the beginning of the plant growth (up to week 14), indicating a random infection by the aphid vector. Additionally, when partitioning the sugarcane plot in different quadrat sizes, all the indexes revealed a random dispersion of the infected plants at the beginning of the plant growth.

The second phase corresponds to the sugarcane phenological stage where the leaves of plants from neighboring rows are in contact with each other. The plant cover results in “bridges” between plants, allowing the migration of the apterous aphids from plant to plant, which results in the contamination of the plants situated next to other infected plants. In general, once alate aphids have settled on a host plant, they autolyse their wing muscles (9). Then local spread may occur only by the apterous vector movement. During this phase the dispersion of diseased plants evolved. After the plant cover is completed, we observed a strong neighborhood effect on short distance. This hypothesis is confirmed when testing neighborhood effect between plants separated by a given distance. When plants are separated by more than 2 m, the neighborhood effect is no more significant in our case. Therefore, the newly SCYLV infected plants aggregated around previous infected areas as seen on other crops (7, 20, 30, 38). Moving from plant to plant is well known in aphid population. Although there is a lack of information on aphid ecology in tropical region and especially on *M. sacchari*, we observed that the behavior of this aphid specie was similar to other aphid species in temperate region excluding seasonal variations and sexual reproduction. Most species of aphids, at all stages of development, move about over the surface of their host plants and even between the adjacent plants. Local dispersal is usually in response to overcrowding or deterioration in host quality, or both. In addition, ants may help for dispatching aphids from plant to plant (9). As a matter of comparison, the spatial pattern of Carlavirus-infected plants in Australian hop gardens were strongly influenced by plant contact. This was suggestive of either mechanical transmission or movement of apterous vectors through “bridges” formed between plants during plant contact (30). SCYLV is known to be transmitted only by aphids, like the other members of *Luteoviridae*. Consequently, the spatial aggregation of infected plants could only due to movement of aphids. Additionally to neighborhood effect, small quadrat dispersion evolved to a positive autocorrelation. The autocorrelation indicates a similar infection level in neighbor quadrats with overall infection variation. Moreover, the surface fitting of the infection rate revealed a basin effect when the dispersion is no more random, indicating border effects. As aphids detect contrasted colors (10) they may land on the first rows when the plant cover is completed because of contrasted color with the

surrounding area. This could be one of the reasons of the observed border effect.

Before the plant cover, we could not reject the hypothesis of random contamination of plants. On the other hand, after the plant cover, when disease spread in the vicinity of infected plants, an irregular dispersion of infected plants appears. It may be possible that the irregular infection was present during the first phase, but detected only after a neighborhood spread of the disease, which amplified the first disease dispersal. However, border effect may explain the irregular dispersion as discussed before. So we finally consider that during the first phase plant contamination was random. Moreover, a random distribution is expected in primary spread when the majority of infective vectors invade from outside the field (38).

Virus disease spread in two different phases was also observed for the Sharka disease caused by *Plum pox virus* (7). The spatial pattern was first no aggregative and then exhibited high aggregation of symptomatic trees at all spatial scales. This suggests that aphid transmission to neighboring trees occurred frequently. Other authors described vectored virus diseases by a combination of background and local transmission (20, 30). In our case background was clearly identified as the first step of plant infection by SCYLV.

The results obtained with the spatiotemporal statistical analyses led us to build a stochastic model of spatiotemporal infection spread generalizing the one proposed by Gibson and Austin (17) in the case of tree infections. This generalization has two steps. Firstly, we take into account the two-phase evolution of plant infections. Secondly, the infective pressure variation is not considered as a constant function of time as proposed by Gibson and Austin (17) because the number of aphids varies in time as well as the number of infected aphids. The question addressed in this modeling is describing and explaining the infection spread in space and time, and also predicting the proportion of infected plants at a given date in order to compare different management strategies, and then improving the quality of decision making with respect to crop protection requirement and environmental conditions.

Van Maanen and Xu (40) reviewed various modeling processes in the framework for developing epidemiological models. Many relevant papers are discussed and the focus is on forecasting temporal disease dynamics and quantifying spatial patterns as in Gibson *et al.* (19). As pointed out by Gibson (18), several choices are possible for the relationship between infective pressure and distance (between one infected plant and a virus free one). The infective pressure expression we chose took into account the aphid population levels and gave us a good fitting to our observations.

It would be interesting to take into consideration an infectious factor: the alate aphids which arrived on the plot were more or less infectious according to whether they came from a high

infected plot or not as mentioned by Smith *et al.* (38). In addition, the dispersion of the disease can have been influenced by the vector capacity to acquire and to transmit the SCYLV as described for the MSV (33). It is worth noticing that a recent methodology for modeling disease incidence data has been developed by Kottas *et al.* (24). This approach is based on spatial Dirichlet processes (11) and provides flexibility in modeling spatial random effects and covariate information.

The model described here will be applied in further studies. Since cultivars are known to resist to virus infection and the one we used in this study is susceptible to SCYLV, it will be interesting to analyze how the resistance of the host cultivar can influence the different parameters of this model, and the consequences on forecasting.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported in part by the “Conseil régional de Martinique”, the “Conseil régional de Guadeloupe”, and the European social funds. We would like to thank R. Boisne-Noc, S. Joseph, for technical assistance, and Professor Gavin Gibson for advice and comments on a preliminary draft of the manuscript.

LITTERATURE CITED

1. Abu Ahmad, Y., Rassaby, L., Royer, M., Borg, Z., Braithwaite, K. S., Mirkov, T. E., Irej, M. S., Perrier, X., Smith, G. R. and Rott, P. 2006. Yellow leaf of sugarcane is caused by at least three different genotypes of *sugarcane yellow leaf virus*, one of which predominates on the Island of Réunion. *Arch. Virol.*, 151: 1355-1371.
2. Abu Ahmad, Y., Costet, L., Daugrois, J. H., Nibouche, S., Letourmy, P., Girard, J. C. and Rott, P. 2007. Variation in infection capacity and in virulence exists between genotypes of *sugarcane yellow leaf virus*. *Plant Dis.*, 91: 253-259.
3. Celini, L. and Vaillant, J. 1999. Répartition spatio-temporelle des présences d'ailés d'*Aphis gossypii* (Hemiptera, Aphididae) en culture cotonnière. *Can. Entomol.*, 131, 813-824.
4. Celini, L. and Vaillant, J. 2004. A model of temporal distribution of *Aphis gossypii* (Glover) (Hemiptera, Aphididae) on cotton. *J. Appl. Ent.*, 128, 133-139.
5. Comstock, J. C., Irej, M. S., Lockhart, B. E. L. and Wang, Z. K. 1998. Incidence of

- yellow leaf syndrome in CP cultivars based on polymerase chain reaction and serological techniques. *Sugar Cane*, 4: 21-24.
6. Comstock, J. C., Miller, J. D., Tai, P.Y. P., and Follis, J. E. 1999. Incidence of and resistance to *sugarcane yellow leaf virus* in Florida. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.*, 23: 366-372.
 7. Dallot, S., Gottwald, T., Labonne, G. and Quiot, J.-B. 2003. Spatial pattern analysis of Sharka Disease (*Plum pox virus* Strain M) in peach orchards of southern France. *Phytopathology* 93: 1543-1552.
 8. D'Arcy, C. J. and Domier, L. L. 2005. Luteoviridae In: *Virus Taxonomy*. VIIIth Report of the International Committee on Taxonomy of Viruses. C.M. Fauquet, M.A. Mayo, J. Maniloff, U. Desselberger and L.A. Ball (Eds). Elsevier Academic Press, New York, USA pp. 891-900.
 9. Dixon, A. F. G. 1998. *Aphid ecology*. Chapman and Hall, London, UK.
 10. Döring, T. F., Kirchner, S. M., Kühne, S., and Saucke, H. 2004. Response of alate aphids to green targets on coloured backgrounds. *The Netherlands Entomological Society Entomologia Experimentalis et Applicata* 113: 53–61.
 11. Duan, J. A., Guindani, M. and Gelfand, A.E. 2007. Generalized spatial Dirichlet process models. *Biometrika* 94 : 809-825.
 12. Edon-Jock, C., Rott, P., Vaillant, J., Fernandez, E., Girard., J.-C., and Daugrois, J.-H. 2007. Status of *Sugarcane yellow leaf virus* in commercial fields and risk assessment in Guadeloupe. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane technol.*, XXVI ISSCT Congress, ICC Durban South Africa Vol. 26: pp. 995-1004.
 13. Feldmann, P., Sapotille, J., Grédoire, P. and Rott, P. 1994. Micro-propagation of sugar cane. In: *In vitro Culture of Tropical Plants*, Teisson C (ed). La Librairie du Cirad, Montpellier, France, pp. 15–17
 14. Fernandino, F. J. 2004. Measuring spatial aggregation in binary epidemics: correlative analysis and the advantage of fractal-based sampling. *Phytopatology*, 89, 603-608.
 15. Fondong, V. N., Thresh, J. M. and Zok, S. 2002. Spatial and temporal spread of *Cassava Mosaic Virus* in Cassava grown alone and when intercropped with Maize and/or Cowpae. *J. Phytopathology* 150, 365-374.
 16. Freckleton, R.P. 2002. On the misuse of residuals in ecology: regression of residuals vs multiple regression. *Journal of Animal Ecology*, 71, 542-545.
 17. Gibson, G. J. and Austin, E. J. 1996. Fitting and testing spatio-temporal stochastic models with application in plant epidemiology. *Plant pathology*, 45, 172-184.

18. Gibson, G. J. 1997. Investigating mechanisms of spatio-temporal epidemic spread using stochastic models. *Phytopathology*, 87, 139-146.
19. Gibson, G. J., Kleczkowski, A., and Gilligan, C.A. 2004. Bayesian analysis of botanical epidemics using stochastic compartmental models. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 101:12120-12124.
20. Gottwald, T. R., Gibson, G. J., Garnsey, S. M., and Irey, M. 1999. Examination of the effect of Aphid vector population composition on the spatial dynamics of Citrus Tristeza Virus spread by stochastic modeling. *Phytopathology*, 94, 1215-1227.
21. Gray, S., and Gildow, F. E. 2003. Luteovirus-aphids interaction. *Annu. Rev. Phytopathol.* 41: 539-66.
22. Hugues, G., McRoberts, N., Madden, L. V., and Nelson, S. C. 1997. Validating mathematical models of plant-disease progress in space and time. *Math Med Biol*, 14: 85 - 112.
23. Jeger, M. J., Holt, J., Van Den Bosch, F. and Madden, V. 2004. Epidemiology of insect-transmitted plant viruses: modelling disease dynamics and control interventions. *Physiological Entomology* 29, 291-304.
24. Kottas, A., Duan, J. A. and Gelfand, A. E. 2007. Modeling disease incidence data with spatial and spatio-temporal Dirichlet process mixtures. *Biometrical Journal* 49, 1-14.
25. Lehrer, A. T., Schenck, S., Yan, S.-L., and Komor, E. 2007. Movement of aphid-transmitted Sugarcane yellow leaf virus (SCYLV) within and between sugarcane plants. *Plant Pathology* 56, 711-717.
26. Lockhart, B. E. L., Irey, M. S. and Comstock, J. C. 1996. *Sugarcane bacilliform virus*, *sugarcane mild mosaic virus* and sugarcane yellow leaf syndrome. In: *Sugarcane germplasm conservation and exchange*. B.J. Croft, C.M. Piggin, E.S. Wallis and D.M. Hogarth (Eds). ACIAR Proceedings No. 67, Canberra, Australia pp. 108-112.
27. Lockhart, B. E. L. and Cronjé, C. P. R. 2000. Yellow leaf syndrome. In: *A guide to sugarcane diseases*. P. Rott, R.A. Bailey, J.C. Comstock, B.J. Croft and A.S. Saumtally (Eds). La Librairie du Cirad, Montpellier, France, pp. 291-295.
28. Marion, G., Gibson, G. J., Renshaw, E. 2003. Estimating likelihoods for spatio-temporal models using importance sampling. *Statistics and computing*, 13, 111-119.
29. Moonan, F, Molina, J. and Mirkov, T. E. 2000. *Sugarcane yellow leaf virus*: an emerging virus that has evolved by recombination between luteoviral and poleroviral ancestors. *Virology*, 269: 156-171.
30. Pethybridge, S. J. and Madden, L. V. 2003. Analysis of spatiotemporal dynamics of

- virus spread in an Australian hop garden by stochastic modeling. *Plant Dis.*, 87: 56-62.
31. Rasmussen, J. G., Moller, J., Aukema, B. H., Raffa, K. F., and Zhu, J. 2006. Bayesian inference for multivariate point processes observed at sparsely distributed times. *Research report R-2006-24*. Department of Mathematical Sciences, Aalborg University.
 32. Rassaby, L., Girard, J. C., Lemaire, O., Costet, L., Irej, M. S., Kodja, H., Lockhart, B. E. L. and Rott, P. 2004. Spread of *Sugarcane yellow leaf virus* in sugarcane plants and fields on the Island of Réunion. *Plant Pathol.*, 53: 117-125.
 33. Rose, D.J.W. 1974. The epidemiology of maize streak virus in relation to population densities of *Cicadulina* spp. *Annals of Applied Biology*, 76, 199-207.
 34. Scagliusi, S. M. and Lockhart, B. E. L. 2000. Transmission, characterization, and serology of a luteovirus associated with yellow leaf syndrome of sugarcane. *Phytopathology*, 90: 120-124.
 35. Schenck, S., Hu, J. S., and Lockhart, B. E. L. 1997. Use of a tissue blot immunoassay to determine the distribution of *Sugarcane yellow leaf virus* in Hawaii. *Sugar Cane*, 4: 5-8.
 36. Schenck, S., and Lehrer, A.T. 2000. Factors affecting the transmission of *Sugarcane yellow leaf virus*. *Plant Dis.*, 84: 1085-1088.
 37. Schenck, S. 2001. Sugarcane yellow leaf syndrome: history and current concepts. In: *Sugarcane pathology. Vol. II: Virus and Phytoplasma Diseases*. G.P. Rao, R.E. Ford, M. Tomic and D.S. Teakle (Eds). Science Publishers Inc, Enfield, USA pp. 25-35.
 38. Smith, M. C., Page, W. W., Holt, J., and Kyetere, D. 2000. Spatial dynamics of *maize streak virus* disease epidemic development in maize fields. *International journal of pest management*, 46(1) 55-66.
 39. Taylor, L. R. 1984. Assessing and interpreting the spatial distributions of insect populations. *Ann. Rev. Entomol.*, 29, 321-357.
 40. Van Maanen, A., Xu, X. M. 2003. Modelling plant disease epidemics. *European Journal of Plant Pathology* 109: 669–682.
 41. Vega, J., Scagliusi, S. M. M., and Ulian, E. C. 1997. Sugarcane yellow leaf disease in Brazil: Evidence of association with a luteovirus. *Plant Dis.*, 81: 21-26.
 42. Welham, S. J., Cullis, B.R., Kenward, M.G., Thompson, R. 2006. The analysis of longitudinal data using mixed model L-splines. *Biometrics*, 62, 392-401.
 43. Zhou, G. H., Li, J.G., Xu, D. L., Shen, W. K., Deng, H.H. 2006. Occurrence of *Sugarcane yellow leaf virus* in South China and its transmission by the sugarcane-colonizing aphid, *Ceratovacuna lanigera*. *Scientia Agricultura Sinica*, 39: 2023-2027.

TABLES

Table 1. Dispersion index (DI) of SCYLV infected plants per quadrat and its p-value for each observation date and quadrat size. The significant p-values for a 4% significance threshold are in bold characters.

Quadrat size	week 6		week 10		week 14		week 19		week 23	
	DI	p-value	DI	p-value	DI	p-value	DI	p-value	DI	p-value
3 x 3	0.961	0.609	1.201	0.061	1.155	0.111	1.152	0.115	1.281	0.018
6 x 3	0.921	0.655	1.313	0.048	1.313	0.048	1.296	0.057	1.527	0.005
3 x 6	0.921	0.655	1.313	0.048	1.247	0.080	1.614	0.001	1.748	0.000
6 x 6	0.839	0.721	1.449	0.051	1.264	0.148	1.625	0.015	2.008	0.001
12 x 12	0.667	0.701	1.325	0.234	1.347	0.223	0.868	0.531	2.283	0.025

Table 2. Spatial Moran index (MI) of SCYLV infected plants per quadrat and its p-value for each observation date and quadrat size. The significant p-values for a 4% significance threshold are in bold characters.

Quadrat size	week 10		week 14		week 19		week 23	
	MI	p-value	MI	p-value	MI	p-value	MI	p-value
3 x 3	-0.021	0.583	0.040	0.153	0.169	0.001	0.198	0.000
6 x 3	-0.038	0.607	-0.017	0.476	0.005	0.359	0.131	0.024
3 x 6	0.048	0.162	0.035	0.214	0.192	0.004	0.175	0.005
6 x 6	0.074	0.127	0.056	0.170	0.049	0.196	0.109	0.078
12 x 12	-0.114	0.324	0.057	0.131	0.012	0.165	-0.122	0.342

Table 3. Space-time autocorrelation index (SPI) of SCYLV infected plants and its p-value for each observation date. The significant p-values for a 4% significance threshold are in bold characters.

week 10		week 14		week 19		week 23	
SPI	p-value	SPI	p-value	SPI	p-value	SPI	p-value
-0.012	0.234	-0.024	0.720	0.117	0.000	0.071	0.001

Table 4. Distribution of the number of newly SCYLV-infected next neighbors between to consecutive observation dates.

plant status	Observation date		Following date	number of newly infected next neighbors at the following date				
	date	number of plants		0	1	2	3	4
virus free	week 6	1637	week 10	1568	66	3	0	0
infected		6		6	0	0	0	0
virus free	week 10	1619	week 14	1457	151	11	0	0
infected		24		23	1	0	0	0
virus free	week 14	1575	week 19	1146	362	60	7	0
infected		68		35	24	6	3	0
virus free	week 19	1438	week 23	1180	230	25	3	0
infected		205		152	44	9	0	0

Table 5. Joincount test for neighborhood effect according to distance between plants of SCYLV-infected pairs at weeks 19 and 23. When the observed number of infected plant pairs is significantly different from the expected number under the hypothesis of random distribution at the 5% level, the p values are in bold character.

Week 23				
neighborhood distance	number of links per plant	Expected statistic	Observed statistic	p value
]0.5-1]	1.95	50.67	62.00	0.020
]1-1.5]	3.81	98.00	120.00	0.0047
]1.5-2]	9.32	241.32	266.00	0.003
]2-2.5]	9.15	236.76	246.00	0.247
]2.5-3]	7.21	186.58	190.00	0.386
Week 19				
neighborhood distance	number of links per plant	Expected statistic	Observed statistic	p value
]0.5-1]	1.95	24.94	32	0.053
]1-1.5]	3.81	48.53	60	0.0301
]1.5-2]	9.32	118.77	139	0.019
]2-2.5]	9.15	116.52	126	0.1685
]2.5-3]	7.21	91.83	97	0.275

FIGURES

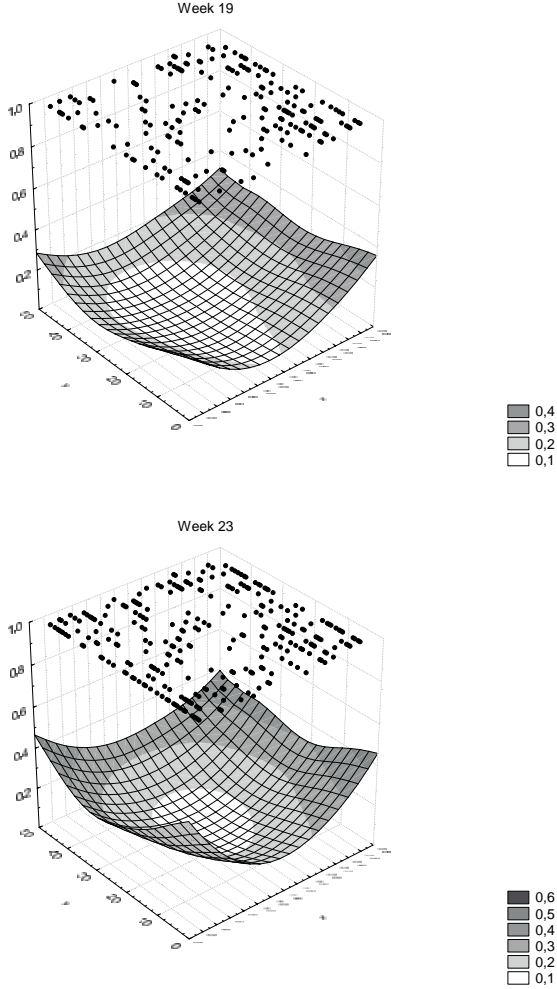


Fig. 1. Spatial distribution of infected plants at weeks 19 and 23. Grey scale indicates local intensity of infection by SCYLV. Points give the spatial position of infected plants.

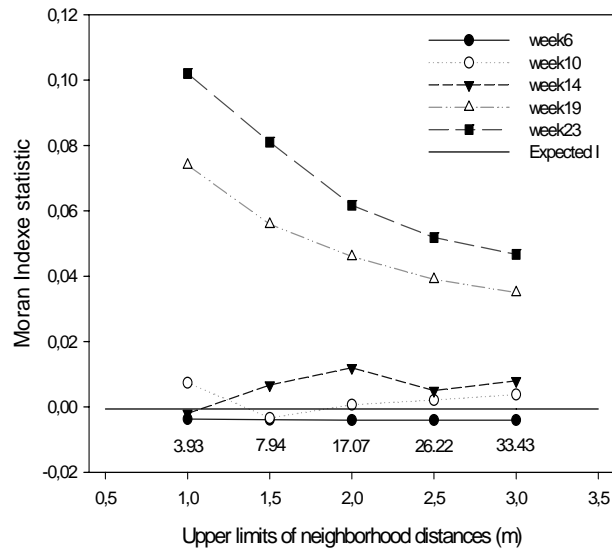


Fig. 2. Moran Index statistic on the same statue value (disease free or infected) of plants for different neighborhood distances at five different sampling dates. The numbers below the curves indicate the average of links per individual. The black straight line represents the calculation of the Moran Index statistic under the hypothesis of completely random distribution in the case of this trial. $MI = -0.0006$.

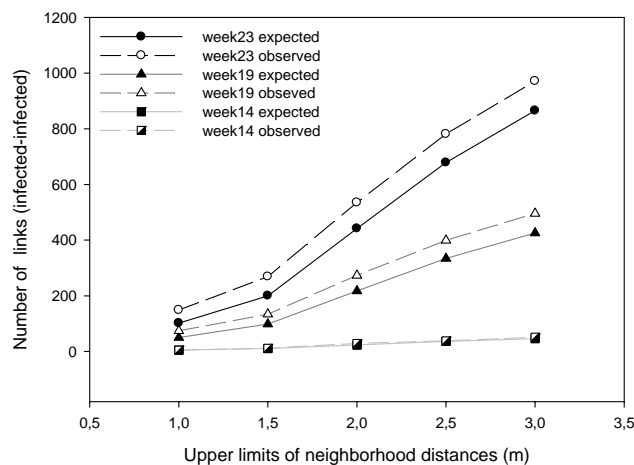


Fig. 3. Number of links between infected plants according to neighborhood distances at weeks 14, 19 and 23. Observed statistic (dashed curves) for infected neighbor plants is compared to expected value (full curves) under the hypothesis of completely random distributions of infected plants.

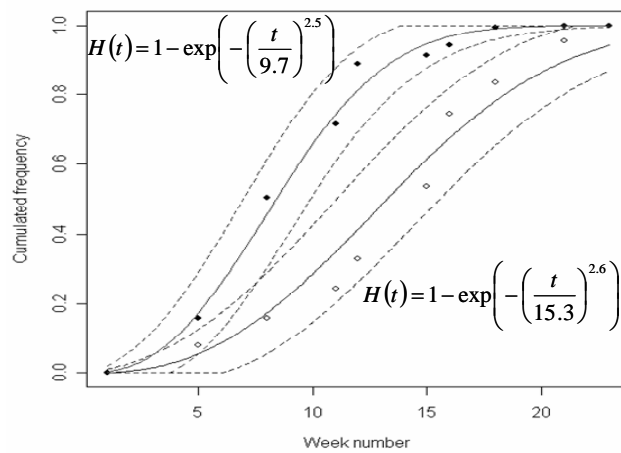


Fig. 4. Cumulated infective capacity and its 95% confidence band: a/estimated by means of the time distribution of alate aphids (black diamonds); b/ estimated by means of the time distribution of apterous and larva aphids (white diamonds). The estimated curve equations are given for each estimation.

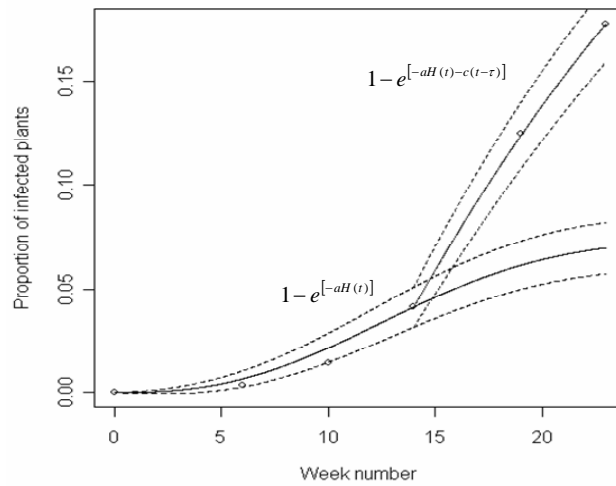


Fig. 5. SCYLV plant infection evaluated by the model equations. The curve expressed by $1 - \exp(-aH(t))$ represents the proportion of SCYLV-infected plants with the 95% confidence band and expected proportion of infected plants under the hypothesis of completely random distribution of infections with $a^* = 0.077$ (estimate of the background infection parameter). From week 14, the curve expressed by $1 - \exp(-aH(t) - c(t - \tau))$ stand for the 95% confidence interval and expected proportion of infected plants under the hypothesis of local transmission of infection with the local interaction parameter $b^* = 1.1$. The curve is an approximation (estimation) of the expected proportion under the hypothesis of local contaminations with $c^* = 0.014$, $\tau = 14$ week (date of plot cover) and $H(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{15.3}\right)^{2.6}}$.

3-ESSAI TROIS CULTIVARS

A la suite de l'étude épidémiologique menée sur une parcelle du cultivar brésilien SP71-6163 dont les plants étaient sains à la plantation, une question importante s'impose. Quel serait le comportement des cultivars locaux face à l'infection par le SCYLV ? En effet, l'état des lieux réalisé nous a permis de supposer que les cultivars locaux supportent ou compensent suffisamment l'infection par le SCYLV pour que l'impact du virus dans la filière canne à sucre ne soit pas important. Dans ce contexte, il nous a paru intéressant de comparer les taux d'infection de nos cultivars à celui du témoin SP71-6163 sensible au SCYLV.

Cette étude nous permet donc de répondre à l'objectif qui est d'approfondir l'influence du cultivar, de l'environnement et de l'insecte vecteur.

3-1-Matériel et méthode

3-1-1-Matériel

3-1-1-1-Multiplication in vitro des plants

Les plantules saines des cultivars B5992, R570 et SP71-6163 sont multipliées végétativement et mises à pousser dans du milieu de culture de Murashige et Skoog sans substance de croissance.

Les plantules sont sevrées comme indiqué précédemment. Après trois mois de croissance en serre les plants sont été transférés au champ.

3-2-1-2-Dispositif expérimental

Pour le premier essai mis en place à Roujol (Petit-Bourg), les trois cultivars sont disposés en bloc répété six fois en ligne et en colonne. Chaque bloc est constitué de trois lignes de 16 plants.

Pour le deuxième est mis en place à Saint-Jean (Petit-Bourg), les trois cultivars sont disposés en bloc répété trois fois en ligne et en colonne. Chaque bloc est constitué de quatre

lignes de 12 plants. Les neuf blocs sont entourés de trois mètres de bordure constituée de plants de SP71-6163.

3-1-2-Méthode

3-1-2-1-Présence / absence du vecteur sur la parcelle

La présence et la densité des populations de *M. sacchari* sont évaluées comme précédemment.

3-1-2-2-Comptage de pucerons

Les populations de *M. sacchari* sont dénombrées sur 54 plants choisis à raison de six par bloc. Six numéros de plants sont tirés aléatoirement, et les plants correspondant à ces numéros sont échantillonnés dans chacun des blocs.

3-1-2-3-Diagnostic par Immuno-Empreinte

Le SCYLV a été recherché dans tous les plants de la parcelle une fois par mois comme indiqué précédemment.

3-1-2-4-Analyses statistiques

Les données brutes recueillies par observation sur le terrain et analyse en laboratoire sont traitées avec les logiciels SAS version 9.1 et Statistica 7.1.

Les proportions de plantes contaminées par le virus ou les proportions de plantes colonisées par le vecteur sont soumises une transformation arc sinus (arc sinus de la racine carrée) avant d'être soumises aux tests statistiques.

Les intensités de populations de vecteurs représentées par une échelle de notation sont soumises une transformation racine carrée.

De même que précédemment, les moyennes sur les données brutes sont calculées avec la procédure « Mean » ; les tests statistiques sont réalisés avec la procédure « Univariate » et les différents tests sur les mesures répétées ont été réalisés avec la procédure « General Linear Model ».

3-2-Résultats

Le SCYLV a été détecté dans les trois cultivars de l'essai de Roujol et de l'essai de Saint Jean (Figure 25). Le cultivar SP71-6163 est le plus contaminé sur les deux essais. En fin de campagne, les taux d'infection atteignent 100% à Roujol et plus de 60% à Saint-Jean. Le cultivar B5992 se comporte différemment lors des deux essais. En effet, à Roujol, les taux d'infection atteignent plus de 80% en fin de campagne contre moins de 2% à Saint-Jean. De même, le cultivar R570 est contaminé à près de 50% à Roujol, contre 7% à Saint-Jean (Figure 37).

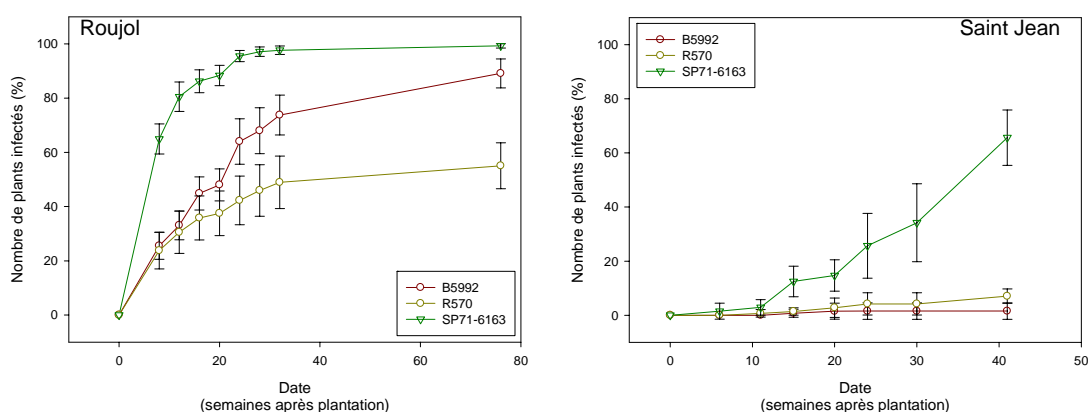


Figure 37. Evolution de la proportion de plants infectés en fonction des cultivars. A chaque date, la moyenne des parcelles de chaque cultivar a été faite. Les barres représentent les intervalles de confiance de sécurité 95%. Le premier graphique présente les résultats de l'essai 1 à Roujol, le deuxième graphique présente les résultats de l'essai 2 à Saint-Jean.

Jusqu'en semaine 15, les populations de vecteur dénombrées sur les trois cultivars de l'essai 2 à Saint-Jean ne sont pas significativement différentes et varient beaucoup au cours du temps (Figure 38). En fin de campagne, les populations de vecteurs sont plus importantes sur les plants de B5992 que sur les plants de SP71-6163. Les plants de R570 sont les moins colonisés.

Les proportions de plants infectés par parcelle d'un cultivar ne suivent toujours pas une loi normale après une transformation arc sinus des proportions. La probabilité que la répartition des données suivent une loi normale est $p < 0,01$ selon le test de Kolmogorov-Smirnov. A partir de la semaine 15, ces données suivent une loi normale.

Les moyennes du nombre de pucerons dénombrés sur les 18 plants d'une parcelle de cultivar ne sont pas normales même après transformation logarithmique.

Malgré les écarts par rapport à une loi normale, les données sont tout de même analysées avec la procédure GLM qui tolère les écarts à la normalité.

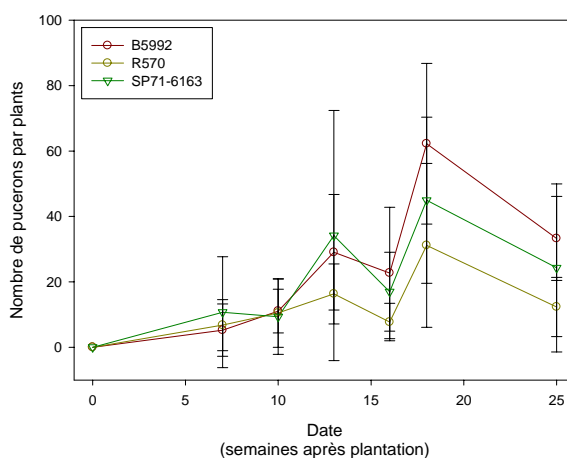


Figure 38. Evolution des populations de *M. sacchari* sur 54 plants de l'essai 2. A chaque date, la moyenne du nombre de pucerons dénombrés sur 18 plants par cultivar a été faite. Les barres représentent les intervalles de confiance de sécurité 95%.

En semaines 7, 10, 13, 16, les trois cultivars sont colonisés de la même façon (Annexe 12 tableau 12-1). Par contre, en semaine 18, le cultivar B5992 est le plus colonisé, la quantité de pucerons trouvée sur B5992 est significativement différente de celle trouvée sur le cultivar R570 ($p=0,032$). Il en est de même en semaine 25 ($p=0,001$).

3-3-Conclusions et discussion

Lors des deux essais, les cultivars locaux B5992 et R570 ont été contaminés moins vite que le témoin brésilien SP71-6163. De plus, ces deux cultivars restent moins contaminés que le témoin brésilien à la fin de la campagne de diagnostic.

L'essai 1 (Roujol) a été mis en place dans un milieu où la pression parasitaire est très élevée. En effet, les parcelles de la station sont régulièrement coupées, ce qui induit un arrivage constant de pucerons. De plus, les parcelles de collection des variétés constituent un inoculum de SCYLV important. Ces parcelles sont replantées environ tous les quatre ans à partir de boutures issues de ces mêmes parcelles. Les variétés de la collection sensibles au SCYLV sont donc totalement contaminées depuis des années. L'arrivage constant de pucerons de l'espèce *M. sacchari* et la conservation du SCYLV au sein de la collection sont deux facteurs pouvant expliquer une contamination rapide des plantes à Roujol.

Le dispositif du deuxième essai (Saint-Jean) devait être identique au premier, cependant il était impossible d'obtenir le nombre requis de plants pour la plantation. Il a donc fallu imaginer un dispositif plus petit. Nous sommes passés de 12 répétitions pour le premier essai à trois répétitions. Afin d'isoler le phénomène de bordure, et par conséquent de pouvoir étudier la contamination à l'intérieur de la parcelle, le dispositif a été bordé par trois mètres de plants de SP71-6163 disponible en *c. i. v.*

Les conditions environnementales du deuxième essai étaient plus proches de celle des parcelles commerciales. En effet, à Saint-Jean, il n'y avait que des parcelles expérimentales constituées de variétés prometteuses. De plus, les coupes sont moins fréquentes à Saint-Jean. L'arrivage de pucerons est moins important à Saint-Jean, et les parcelles moins contaminées, la pression parasitaire était donc moins élevée à Saint-Jean. C'est pourquoi la contamination des trois cultivars était moins rapide lors du deuxième essai.

Bien que lors du premier essai, le cultivar B5992 se distinguait significativement du cultivar R570, il est impossible de conclure sur une éventuelle différence de comportement entre ces deux cultivars car dans le deuxième essai, ils ne se distinguaient pas significativement l'un de l'autre. Cependant, il est possible de conclure que les cultivars B5992 et R570 soient plus résistants à l'infection que le cultivar SP71-6163.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Au début de nos travaux de recherche sur la maladie de la feuille jaune, de nombreuses études avaient été menées à travers le monde, cependant, aucune étude approfondie n'avait été réalisée en Guadeloupe et Martinique. Par conséquent, au cours de cette thèse, nous avons décidé de reprendre certains axes de recherche afin d'analyser les problématiques propres au contexte de notre étude. Nous avons donc analysé et comparé la répartition et la diversité du SCYLV ainsi que la répartition de son vecteur sur deux îles proches. Nous avons également analysé l'incidence de l'infection par le SCYLV sur les cultivars de ces deux îles. Et enfin, nous avons déterminé et modélisé la contamination au champ de plants sains par le SCYLV.

Notre étude montre que les variétés commerciales cultivées en Guadeloupe sont plus résistantes à l'infection par le SCYLV que la variété témoin sensible SP71-6163. Cependant, le SCYLV est présent dans tous les cultivars et dans toutes les zones de culture de Guadeloupe (0 à 28%) et Martinique (7 à 98%) inclus dans notre étude. De plus, les mêmes cultivars sont beaucoup moins infectés en Guadeloupe (9% pour B5992, environ 0% pour B69566 et 2% pour R570) qu'en Martinique (57% pour B5992, 24% pour B69566 et 22% pour R570). Ces écarts peuvent être expliqués en partie par les différences de prévalence des génotypes présents. En effet, BRA-PER est présent dans 99,5% des génotypages réalisés en Martinique alors que REU est présent dans 98% des génotypages réalisés en Guadeloupe. D'autres caractères tels que les pratiques culturales, la dynamique des populations de vecteur ou la capacité de ce dernier à transmettre le virus, peuvent avoir un rôle dans les variations observées entre les deux îles. L'impact de la maladie de la feuille jaune en Guadeloupe est donc faible étant donné que l'incidence du virus sur les variétés commerciales de l'île est faible. Par contre, en Martinique, le risque d'impact de la maladie sur la culture de la canne à sucre est beaucoup plus élevé. Ceci suggère de puissantes interactions locales qu'il reste à déterminer. De plus, l'origine des différences de distribution des génotypes du SCYLV entre les deux îles demeure inexplicée et doit être recherchée. Actuellement, la progression de la maladie sur une île donnée ne permet pas de prédire l'évolution de la maladie sur une autre île, bien qu'elles soient proches. Les caractéristiques de la maladie doivent donc être étudiées localement pour analyser les risques d'épidémie et l'impact sur la production de canne à sucre.

La contamination d'une parcelle saine à la plantation est très rapide si la variété est sensible. La contamination est d'abord aléatoire et due à des ailés venants de l'extérieur de la parcelle, puis de proche en proche à partir des infections primaires. Ces informations nous ont permis, en collaboration avec Olivier Jacquet, d'élaborer un outil de prédiction de la dissémination du SCYLV sous forme de modèle mathématique. Cependant, la dynamique spatio-temporelle des populations d'aphides qui est un paramètre important pour la modélisation de l'épidémie, mérite d'être approfondie en tenant compte des variations climatiques et des itinéraires techniques.

Il apparaît que l'incidence du SCYLV n'est pas forcément en constante augmentation. En effet, elle diminue d'une étape à l'autre du schéma de pépinière pour les cultivars R570 et B5992 et d'un cycle de culture à l'autre pour le cultivar B69566 en Martinique. Les mécanismes de résistance des cultivars à l'infection par le SCYLV demeurent inconnus et doivent être explorés.

L'impact réel de la maladie de la feuille jaune sur la production de canne à sucre dans la Caraïbe reste indéterminé. Au regard des résultats que nous avons acquis, cette maladie pourrait être intégrée au programme d'amélioration et de sélection variétale. Dans ce cadre l'étude des mécanismes de résistance ou la recherche de marqueurs peuvent être un atout pour la sélection variétale. L'utilisation de variétés résistantes aux principales maladies et aux insectes, adaptées aux conditions de culture, plus riches en sucre et en masse végétale pour la transformation en bioénergies reste la meilleure stratégie pour la production cannière.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abu Ahmad, Y., Rassaby, L., Royer, M., Borg, Z., Braithwaite, K.S., Mirkov, E., Irey, M.S. Perrier, X., Smith, G.R. and Rott, P. (2006a). Yellow leaf of sugarcane is caused by at least three different genotypes of *Sugarcane yellow leaf virus*, one of which predominates on the Island of Réunion. *Archive of Virology*, 151: 1355-1371.
- Abu Ahmad, Y., Royer, M., Daugrois, J.H., Costet, L., Lett, J.M., Victoria, J.I., Girard, J.C. and Rott, P. (2006b). Geographical distribution of four *Sugarcane yellow leaf genotypes*. *Plant Disease*, 90: 1156-1160.
- Abu Ahmad, Y., Costet, L., Daugrois, J.H., Nibouche, S., Letourmy, P., Girard, J.C. and Rott, P. (2007). Variation in infection capacity and in virulence exists between genotypes of *Sugarcane yellow leaf virus*. *Plant Dis.*, 91: 253-259.
- Abu Ahmad, Y., Girard, J.C., Fernandez E., Pauquet J., Lockhart B.E.L., Letourmy, P. and Rott, P. (2007b). Variation in virus populations and growth characteristics of two sugarcane cultivars naturally infected by *Sugarcane yellow leaf virus* in different geographical locations *Plant Pathology*. (in press).
- Autrique, A., Ntahimpera, L. (1994). Atlas des principales espèces de pucerons rencontrées en Afrique Sud-Saharienne. Administration Générale de la Coopération au Développement. Publication Agricole n°33.
- Borg, Z., Moonan, F., Braithwaite, K., Mirkov, T.E. and Smith, G. (2001). Characterising the genetic diversity of Sugarcane yellow leaf virus. In *Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists*, 24: 654-656.
- Celini, L. and Vaillant, J. (1999). Répartition spatio-temporelle des présences d'ailés d'*Aphis Gossipii* (Hemiptera, Aphididae) en culture cotonnière. *Canadian Entomologist*, 131, 813-824.
- Celini, L. and Vaillant, J. 2004. A model of temporal distribution of *Aphis Gossypii* (Glover) (Hem., Aphididae) on cotton. *Journal of Applied Entomology*, 128, 133-139.
- Chatenet, M., Delage, C., Ripolles, M., Irey, M., Lockhart, B.E.L. and Rott, P. (2001). Detection of *Sugarcane yellow leaf virus* in quarantine and production of virus-free sugarcane by apical meristem culture. *Plant Disease*, 85: 1177-1180.

- Comstock, J.C., Irvine, J.E. and Miller, J.D. (1994). Yellow leaf syndrome appears on the United States mainland. *Sugar Journal*, 56: 33-35.
- Comstock, J.C., Irely, M.S., Lockhart, B.E.L. and Wang, Z.K. (1998). Incidence of yellow leaf syndrome in CP cultivars based on polymerase chain reaction and serological techniques. *Sugar Cane*, 4: 21-24.
- Comstock, J. C., Miller, J. D., Tai, P.Y. P., and Follis, J. E. 1999. Incidence of and resistance to sugarcane yellow leaf virus in Florida. In *Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists*, 23: 366-372.
- Cronjé, C.P.R., Tymon, A.M., Jones, P. and Bailey, R.A. (1998). Association of a phytoplasma with a yellow leaf syndrome of sugarcane in Africa. *Annals of Applied Biology*, 133: 177–186.
- Dallot, S., Gottwald, T., Labonne, G. and Quiot, J.-B. 2003. Spatial pattern analysis of Sharka Disease (*Plum pox virus* Strain M) in peach orchards of southern France. *Phytopathology* 93: 1543-1552.
- D’Arcy, C. J. and Domier, L. L. 2005. Luteoviridae In: *Virus Taxonomy. VIIIth Report of the International Committee on Taxonomy of Viruses*. C.M. Fauquet, M.A. Mayo, J. Maniloff, U. Desselberger and L.A. Ball (Eds). Elsevier Academic Press, New York, USA pp. 891-900.
- Daugrois J.H., Jean-Baptiste I., Lockhart B.E.L., Irely S., Chatenet M. and Rott P. (1999). First report of *Sugarcane yellow leaf virus* in the French West Indies. *Plant Disease*, 83: 588.
- Dixon, A. F. G. 1998. *Aphid ecology*. Chapman and Hall, London, UK.
- Döring, T. F., Kirchner, S. M., Kühne, S., and Saucke, H. 2004. Response of alate aphids to green targets on coloured backgrounds. *The Netherlands Entomological Society Entomologia Experimentalis et Applicata* 113 : 53–61, 2004
- Duan, J. A., Guindani, M. and Gelfand, A.E. 2007. Generalized spatial Dirichlet process models. *Biometrika* 94 : 809-825.
- Edon, C., Vaillant, J., Sauvion, N. and Daugrois, J.H. (2006). Spatiotemporal evolution of plant infection by SCYLV in a disease free plot. Toward modelling virus spread in tropical conditions. VIIIth ISSCT Pathology Workshop Petit-Bourg,

Guadeloupe (FWI), 23 - 27 January 2006.

- Edon-Jock, C., Rott, P., Vaillant, J., Fernandez, E., Girard, J.-C., and Daugrois, J.-H. 2007. Status of *Sugarcane yellow leaf virus* in commercial fields and risk assessment in Guadeloupe. Proc. Int. Soc. Sugar Cane technol., Vol. 26, 2007: pp995-1004. XXVI ISSCT Congress, ICC Durban South Africa 2007.
- Edon-Jock, C., Jacquet, O., Vaillant, J., and Daugrois, J.-H. 2008. Modeling spatio-temporal epidemic spread of *Sugarcane Yellow Leaf Virus* using point processes. To Submit.
- Fauconnier, R., 1991. La canne à sucre. Collection Le technicien d'agriculture tropicale. Editions Maisonneuve et Larose.
- Feldmann, P., Sapotille, J., Grédoire, P. and Rott, P. 1994. Micro-propagation of sugar cane. In: Teisson C (ed) In vitro Culture of Tropical Plants (pp 15–17) La Librairie du Cirad, Montpellier, France
- Fernandino, F. J. 2004. Measuring spatial aggregation in binary epidemics: correlative analysis and the advantage of fractal-based sampling. *Phytopathology*, 89, 603-608.
- Flynn, J., Powell, G., Perdomo, R., Montes, G., Quebedeaux, K. and Comstock, J.C. (2005). Comparison of sugarcane disease incidence and yield of field-run, heat treated and tissue-culture based seedcane. *Journal of American Society of Sugar Cane Technologists*, 25: 88-100.
- Fondong, V. N., Thresh, J. M. and Zok, S. 2002. Spatial and temporal spread of Cassava Mosaic Virus in Cassava grown alone and when intercropped with Maize and/or Cowpae. *Journal of Phytopathology* 150, 365-374.
- Freckleton, R.P. 2002. On the misuse of residuals in ecology: regression of residuals vs multiple regression. *Journal of Animal Ecology*, 71, 542-545.
- Gibson, G. J. and Austin, E. J. 1996. Fitting and testing spatio-temporal stochastic models with application in plant epidemiology. *Plant pathology*, 45, 172-184.
- Gibson, G. J. 1997. Investigating mechanisms of spatio-temporal epidemic spread using stochastic models. *Phytopathology*, 87, 139-146.

- Gibson, G. J., Kleczkowski, A., and Gilligan, C.A. 2004. Bayesian analysis of botanical epidemics using stochastic compartmental models. In Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 101:12120-12124.
- Gottwald, T. R., Gibson, G. J., Garnsey, S. M., and Irey, M. 1999. Examination of the effect of Aphid vector population composition on the spatial dynamics of Citrus Tristeza Virus spread by stochastic modeling. *Phytopatology*, 94, 1215-1227.
- Gray, S. and Gildow, F. E. (2003). Luteovirus-aphids interaction. *Annual Review of Phytopathology*, 41: 539-66
- Hugues, G., McRoberts, N., Madden, L. V., and Nelson, S. C. 1997. Validating mathematical models of plant-disease progress in space and time. *Mathematical Medicine and Biology*, 14: 85 - 112.
- Jeger, M. J., Holt, J., Van Den Bosch, F. and Madden, V. 2004. Epidemiology of insect-transmitted plant viruses: modelling disease dynamics and control interventions. *Physiological Entomology* (2004) 29, 291-304.
- Lehrer, A. T., Schenck, S., Yan, S.-L., and Komor, E. 2007. Movement of aphid-transmitted Sugarcane yellow leaf virus (ScYLV) within and between sugarcane plants. *Plant Pathology* (2007) 56, 711-717.
- Lockhart, B. E. L., Irey, M. S. and Comstock, J. C. 1996. Sugarcane bacilliform virus, sugarcane mild mosaic virus and sugarcane yellow leaf syndrome. In: Sugarcane germplasm conservation and exchange. B.J. Croft, C.M. Piggin, E.S. Wallis and D.M. Hogarth (Eds). In Proceedings of Australian Centre for International Agricultural Research, No. 67, Canberra, Australia pp. 108-112.
- Lockhart, B. E. L. and Cronjé, C. P. R. 2000. Yellow leaf syndrome. In: A guide to sugarcane diseases. P. Rott, R.A. Bailey, J.C. Comstock, B.J. Croft and A.S. Saumtally (Eds). La Librairie du Cirad, Montpellier, France pp. 291-295.
- Marion, G., Gibson, G. J., Renshaw, E. 2003. Estimating likelihoods for spatio-temporal models using importance sampling. *Statistics and computing*, 13, 111-119.
- Moonan, F, Molina, J. and Mirkov, T. E. 2000. *Sugarcane yellow leaf virus*: an emerging virus that has evolved by recombination between luteoviral and poleroviral ancestors. *Virology*, 269: 156-171.

- Moonan, F. and Mirkov, T.E. (2002). Analyses of the genotypic diversity among North, South, and Central American isolates of *Sugarcane yellow leaf virus*. Evidence for Colombian origins and for intraspecific spatial phylogenetic variation. *Journal Virology*, 76: 1339-1348.
- Pethybridge, S. J. and Madden, L. V. 2003. Analysis of spatiotemporal dynamics of virus spread in an Australian hop garden by stochastic modeling. *Plant Disease*, 87: 56-62.
- Rasmussen, J. G., Moller, J., Aukema, B. H., Raffa, K. F., and Zhu, J. 2006. Bayesian inference for multivariate point processes observed at sparsely distributed times. *Research report R-2006-24*. Department of Mathematical Sciences, Aalborg University.
- Rassaby, L. (2001). Le syndrome de la feuille jaune de la canne à sucre causé par le *Sugarcane yellow leaf virus (ScYLV)* à la réunion : caractérisation et impact. Mémoire de thèse.
- Rassaby, L., Girard, J.C., Letourmy, P., Chaume, J., Irej, M.S., Lockhart, B.E.L., Kodja, H. and Rott, P. (2003). Impact of *Sugarcane yellow leaf virus* on sugarcane yield and juice quality in Réunion Island. *European Journal of Plant Pathology*, 109: 459–466, 2003.
- Rassaby, L., Girard, J. C., Lemaire, O., Costet, L., Irej, M. S., Kodja, H., Lockhart, B. E. L. and Rott, P. 2004. Spread of *Sugarcane yellow leaf virus* in sugarcane plants and fields on the Island of Réunion. *Plant Pathology*, 53: 117-125.
- Remaudière, G. et Remaudière, M. (1997). Catalogue des *Aphididae* du monde. *Homoptera, Aphidoidea*. Techniques et pratiques. INRA Editions.
- Rose, D.J.W. 1974. The epidemiology of maize streak viruses in relation to population densities of *Cicadulina* spp. *Annals of Applied Biology*, 76, 199-207.
- Rott, P., Bailey, R. A., Comstock, J. C., Croft, B. J., and Saumtally, A. S., 2000. A guide to sugarcane diseases. Cirad Publications Service.
- Scagliusi, S. M. and Lockhart, B. E. L. 2000. Transmission, characterization, and serology of a luteovirus associated with yellow leaf syndrome of sugarcane. *Phytopathology*, 90: 120-124.

- Schenck, S., Hu, J.S. and Lockhart, B.E.L. (1997). Use of a tissue blot immunoassay to determine the distribution of *Sugarcane yellow leaf virus* in Hawaii. *Sugar Cane*, 4: 5-8.
- Schenck, S., and Lehrer, A.T. 2000. Factors affecting the transmission of *Sugarcane yellow leaf virus*. *Plant Disease.*, 84: 1085-1088.
- Schenck, S. (2001). Sugarcane yellow leaf syndrome: history and current concepts. In: *Sugarcane pathology. Vol. II: Virus and Phytoplasma Diseases*. G.P. Rao, R.E. Ford, M. Tosic and D.S. Teakle (Eds). Science Publishers Inc, Enfield, USA pp. 25-35
- Smith, M. C., Page, W. W., Holt, J., and Kyetere, D. 2000. Spatial dynamics of maize streak virus disease epidemic development in maize fields. *International journal of pest management*, 46(1) 55-66.
- Taylor, L. R. 1984. Assessing and interpreting the spatial distributions of insect populations. *Annual Review of Entomology*, 29, 321-357.
- Van Maanen, A., Xu, X. M. 2003. Modelling plant disease epidemics. *European Journal of Plant Pathology* 109: 669–682, 2003.
- Vega, J., Scagliusi, S.M.M. and Ulian, E. C. (1997). Sugarcane yellow leaf disease in Brazil: Evidence of association with a luteovirus. *Plant Disease*, 81: 21-26.
- Welham, S. J., Cullis, B.R., Kenward, M.G., Thompson, R. 2006. The analysis of longitudinal data using mixed model L-splines. *Biometrics*, 62, 392-401.
- Zhou, G. H., Li, J.G., Xu, D. L., Shen, W. K., Deng, H.H. 2006. Occurrence of *Sugarcane yellow leaf virus* in South China and its transmission by the sugarcane-colonizing aphid, *Ceratovacuna lanigera*. *Scientia Agricultura Sinica*, 39: 2023-2027.

ANNEXES

Annexe 1 : Pourcentage de contamination par le SCYLV, pourcentage de colonisation par *M. sacchari* et intensité des populations de *M. sacchari* des parcelles commerciales en canne plantée (CP) et en repousse (R1) en Guadeloupe.

identifiant	cultivar	zone	CP (%)			R1 (%)		
			SCYLV	MS	MS note	SCYLV	MS	MS note
71532	B5992	EBT	18,00	33,33	1,00	nd	nd	nd
71661	B5992	EBT	11,00	50,00	1,00	nd	nd	nd
71664	B5992	EBT	19,67	46,67	1,07	nd	nd	nd
70285	B69566	EBT	0,50	67,50	1,04	nd	nd	nd
71752	B69566	EBT	0,00	90,00	1,50	0,50	100,00	1,63
71754	B69566	EBT	0,25	85,00	1,00	0,50	100,00	1,85
68678	B5992	CEGT	2,33	40,00	1,33	10,00	70,00	1,21
70515	B5992	CEGT	2,50	50,00	2,50	8,50	85,00	1,13
69565	B80689	CEGT	22,00	10,00	1,00	nd	nd	nd
70489	B80689	CEGT	18,50	100,00	2,28	32,50	70,00	1,21
70521	B80689	CEGT	13,00	3,00	1,00	25,00	16,70	1,40
40119	R579	CEGT	35,25	0,00	.	37,14	nd	nd
40135	R579	CEGT	20,49	0,00	.	nd	nd	nd
70556	R579	CEGT	7,50	27,50	1,18	10,33	3,33	1,00
61159	R570	NEBT	0,75	25,00	1,20	2,00	43,33	1,23
70130	R570	NEBT	0,25	67,50	1,15	nd	nd	nd
71771	R570	NEBT	0,50	90,00	1,56	nd	nd	nd
70328	R579	NEBT	1,33	13,33	1,25	5,00	76,67	1,52
70374	R579	NEBT	2,33	10,00	1,00	3,00	36,67	1,09
71541	R579	NEBT	2,00	73,33	1,41	nd	nd	nd
34868	B69566	MG	0,00	45,00	1,11	nd	nd	nd
71785	B69566	MG	0,00	35,00	1,00	0,00	nd	nd
71830	B69566	MG	0,00	70,00	1,21	0,00	nd	nd
55227	B80689	MG	0,00	20,00	1,00	nd	nd	nd
70791	B80689	MG	0,67	0,00	.	nd	nd	nd
71828	B80689	MG	0,00	20,00	1,00	nd	nd	nd
49601	R570	MG	0,00	53,33	1,44	0,50	nd	nd
70848	R570	MG	0,00	16,67	1,00	nd	nd	nd
71827	R570	MG	0,00	40,00	1,25	0,00	nd	nd
71076	B80689	NGT	1,00	13,33	1,50	6,00	13,30	1,00
71083	B80689	NGT	0,67	3,00	1,00	nd	nd	nd
71132	B80689	NGT	1,00	0,00	.	nd	nd	nd
69240	B5992	OGT	10,33	56,57	1,35	nd	nd	nd
71444	B5992	OGT	4,00	45,00	1,33	nd	nd	nd

72039	B5992	OGT	5,50	35,00	1,43	nd	nd	nd
70566	R570	OGT	2,33	6,67	1,00	nd	nd	nd
70568	R570	OGT	5,00	3,00	1,00	nd	nd	nd
69878	R570	OGT	14,58	3,00	1,00	nd	nd	nd
70585	R579	OGT	19,67	20,00	1,20	20,00	46,67	1,60
70591	R579	OGT	11,94	10,00	1,00	17,78	27,70	1,00
72044	R579	OGT	14,00	3,00	1,00	14,33	16,67	1,20
50522	R570	NBT	1,00	57,50	1,30	nd	nd	nd
70383	R570	NBT	2,33	90,00	1,11	6,67	90,00	1,04
71531	R570	NBT	0,50	20,00	1,00	nd	nd	nd
70371	R579	NBT	11,67	46,67	1,36	23,50	85,00	1,06
70387	R579	NBT	11,00	53,33	1,19	7,00	30,00	2,00
70455	R579	NBT	11,33	26,67	1,25	nd	nd	nd

Nord Basse Terre (NBT), Est Basse Terre (EBT), Nord Est Basse Terre (NEBT), Nord Grande Terre (NGT), Ouest Grande Terre (OGT), Centre Est Grande Terre (CEGT) et Marie-Galante (MG) ; nd : non déterminé.

Annexe 2 : Pourcentage de contamination par le SCYLV, pourcentage de colonisation par *M. sacchari* et intensité des populations de *M. sacchari* des parcelles commerciales en canne plantée (CP) et en repousse (R1) en Martinique.

identifiant	cultivar	zone	CP			R1
			SCYLV	MS	MS note	SCYLV
La levée	B5992	Lamentin	80,75	82,50	1,36	97,50
Rosolière	B5992	Lamentin	83,50	90,00	1,17	98,00
Etang 2	B69566	Lamentin	18,33	100,00	1,63	15,67
Etang 1	B69566	Lamentin	43,00	70,00	1,29	36,15
Rond Bois d'Inde	B8008	Rivière Pilote	7,00	70,00	1,21	31,33
Verger	B8008	Rivière Pilote	28,50	37,50	1,07	71,79
Figuier	B69566	Saint Pierre	30,25	35,00	1,14	22,33
Papao	B69566	Saint Pierre	51,00	25,00	1,60	25,33
Cour d'assise Marchande	B5992	Sainte Luce	5,79	15,79	1,00	3,45
Piment	B5992	Sainte Luce	33,00	83,33	1,24	53,50
Crétinoir	B5992	Trinité	16,50	20,00	1,06	30,77
Grand escarpe	B8008	Trinité	15,50	63,33	1,37	19,00
Cacao-Mitan	B8008	Trinité	99,00	55,00	1,36	nd
La meule	B820333	Trinité	9,00	87,50	1,29	30,23
Vévé	B820333	Trinité	17,00	75,00	1,60	nd
Courtois	R570	Trinité	1,67	40,00	1,10	4,83
Rémy Fred	R570	Trinité	12,67	70,00	1,10	39,25

nd : non déterminé.

Annexe 3 : Coefficients de corrélation calculés entre la contamination par le SCYLV en premier cycle de culture (SCYLV CP), en première repousse (SCYLV R1), la colonisation par le vecteur *M. sacchari* en premier cycle de culture (MS CP), en première repousse (MS R1), l'intensité des populations de vecteur en premier cycle de culture (MS note CP) et en première repousse (MS note R1) en Martinique et en Guadeloupe.

Guadeloupe	SCYLV CP	MS CP	MS note CP	SCYLV R1	MS R1	MS Note R1
SCYLV CP	.	-0,14	0,05	0,87	-0,35	-0,35
MS CP		.	0,93	-0,05	0,73	0,71
MS note CP			.	0,19	0,62	0,56
SCYLV R1				.	-0,19	-0,31
MS R1					.	0,92
MS Note R1						.

Martinique	SCYLV CP	MS CP	MS note CP	SCYLV R1
SCYLV CP	.	0,29	0,27	0,81
MS CP		.	0,97	0,42
MS note CP			.	0,3
SCYLV R1				.

Annexe 4 : analyse statistique sur les contaminations par le SCYLV en canne plantée en Guadeloupe

Paramètres :

Cultivars : B5992
 B69566
 B80689
 R570
 R579

Zones : Centre Est Grande Terre (CEGT)
 Est Basse Terre (EBT)
 Marie-Galante (MG)
 Nord Basse Terre (NBT)
 Nord Est Basse Terre (NEBT)
 Nord Grande Terre (NGT)
 Ouest Grande Terre (OGT)

Quadrats : Intérieur
 Extérieur

Nombre d'observations utilisées : 93

Analyse de variance

Tableau 4-1. Analyse de variance sur les moyennes de contaminations par le SCYLV en canne plantée en Guadeloupe

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cultivar	4	0,177	0,044	18,2	0,000
zone	6	0,202	0,034	13,8	0,000
quadrat	1	0,001	0,001	0,34	0,559
cultivar*zone ⁽¹⁾	5	0,101	0,020	8,27	0,000

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique.

(1) les cultivars ne sont pas présents sur toutes les zones, il est donc possible de mesurer six interactions cultivar*zone.

Annexe 5 : Analyse statistique sur les intensités des populations de *M. sacchari* en canne plantée en Guadeloupe

Paramètres

Cultivars : B5992
B69566
B80689
R570
R579

Zones : Centre Est Grande Terre (CEGT)
Est Basse Terre (EBT)
Marie-Galante (MG)
Nord Est Basse Terre (NEBT)
Nord Grande Terre (NGT)
Ouest Grande Terre (OGT)

Analyse de variance

Tableau 5-1. Analyse de variance sur les moyennes des intensités de *M. sacchari* en canne plantée en Guadeloupe

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
zone	5	1,077	0,215	2,69	0,036
Cultivar	4	1,192	0,298	3,71	0,012

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Comparaison de moyennes par le test t :

Tableau 5-2. Moyennes des intensités de *M. sacchari* après transformation arc sinus par cultivar et par zone en canne plantée en Guadeloupe

Cultivar	moyenne (note)	zone	moyenne (note)
B5992	0,878	EBT	0,558
B69566	0,967	EGT	0,593
B80689	0,530	MG	0,544
R570	0,565	NBT	0,934
R579	0,394	NEBT	0,912
		OGT	0,459

Tableau 5-3. Probabilité d'égalité des moyennes des intensités de *M. sacchari* en canne plantée en Guadeloupe

	B5992	B69566	B8008	B82333	R570
B5992	.	0,598	0,022	0,044	0,002
B69566	0,598	.	0,017	0,029	0,004
B80689	0,022	0,017	.	0,800	0,341
R570	0,044	0,029	0,800	.	0,169
R579	0,002	0,004	0,341	0,169	.

Tableau 5-4. Probabilité d'égalité des moyennes des intensités de *M. sacchari* en canne plantée en Guadeloupe

	EBT	EGT	MG	NBT	NEBT	OGT
EBT	.	0,847	0,937	0,079	0,097	0,560
EGT	0,847	.	0,755	0,051	0,067	0,310
MG	0,937	0,755	.	0,029	0,039	0,541
NBT	0,079	0,051	0,022	.	0,895	0,003
NEBT	0,097	0,067	0,039	0,895	.	0,005
OGT	0,560	0,310	0,541	0,003	0,005	.

Annexe 6 : Analyse statistique sur les contaminations par le SCYLV en canne plantée (CP) et en Repousse (R1) en Guadeloupe

Paramètres :

Cultivars : B5992
B69566
B80689
R570
R579

Zones : Centre Est Grande Terre (CEGT)
Est Basse Terre (EBT)
Marie-Galante (MG)
Nord Est Basse Terre (NEBT)
Nord Grande Terre (NGT)
Ouest Grande Terre (OGT)

Cycles : Canne Plantée (CP)
Repousse (R1)

Nombre d'observations utilisées : 21

Analyse de variance

Tableau 6-1. Analyse de variance sur les moyennes de contaminations par le SCYLV en canne plantée en Guadeloupe

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cultivar	4	0,413	0,103	10,67	0,001
zone	5	0,171	0,034	3,53	0,038

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Tableau 6-2. Analyse de variance sur les moyennes de contaminations par le SCYLV en repousse en Guadeloupe

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cultivar	4	0,557	0,139	11,54	0,001
zone	5	0,151	0,030	2,51	0,095

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Comparaison de moyennes par le test t

Tableau 6-3. Moyennes des contaminations par le SCYLV après transformation arc sinus par cultivar en canne plantée (CP) et en repousse (R1) en Guadeloupe

Zone	Arc sinus (moyenne CP)	Arc sinus (moyenne R1)
B5992	-0,067	0,104
B69566	0,150	0,161
B80689	0,184	0,360
R570	0,150	0,186
R579	0,234	0,286

Tableau 6-4. Probabilité d'égalité des moyennes de contaminations par le SCYLV par cultivar en canne plantée en Guadeloupe

	B5992	B69566	B80689	R570	R579
B5992	.	0,218	0,027	0,132	0,011
B69566	0,218	.	0,840	1,000	0,541
B80689	0,027	0,840	.	0,802	0,623
R570	0,132	1,000	0,802	.	0,369
R579	0,011	0,541	0,623	0,369	.

Tableau 6-5. Probabilité d'égalité des moyennes de contaminations par cultivar en canne plantée en Guadeloupe

	B5992	B69566	B80689	R570	R579
B5992	.	0,763	0,040	0,592	0,125
B69566	0,763	.	0,305	0,824	0,417
B80689	0,040	0,305	.	0,266	0,515
R570	0,600	0,824	0,266	.	0,339
R579	0,125	0,417	0,515	0,339	.

Analyse de variance en mesures répétées

Tableau 6-6. Analyse de variance sur les moyennes de contaminations par le SCYLV en mesures répétées en Guadeloupe

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cycle	1	0,045	0,045	51,48	0,000
cycle*cultivar	4	0,010	0,003	2,92	0,071
cycle*zone	5	0,007	0,001	1,54	0,254

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Annexe 7 : Analyse statistique sur les contaminations par le SCYLV dans les pépinières de Guadeloupe

Paramètres :

Cultivars : B5992
R570
R579

Etapas : pépinière II (1)
pépinière III (2)

Nombre d'observations utilisées : 10

Analyse de variance

Tableau 7-1. Analyse de variance sur les moyennes des contaminations par le SCYLV des pépinières de Guadeloupe

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cultivar	2	0,117	0,058	6,51	0,055
étape	1	0,000	0,000	0,03	0,785
cultivar*étape	2	0,019	0,009	1,05	0,431

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Comparaison de moyennes par le test t

Tableau 7-2. Moyennes des contaminations par le SCYLV des cultivars des pépinières de Guadeloupe après transformation arc sinus

Cultivar	Arc sinus (moyenne)
B5992	0,399
R570	0,168
R579	0,382

Tableau 7-3. Probabilité d'égalité des moyennes des contaminations par cultivar des pépinières de Guadeloupe

	B5992	R570	R579
B5992	.	0,048	0,850
R570	0,048	.	0,033
R579	0,850	0,033	.

Annexe 8 : Analyse statistique sur les contaminations par le SCYLV en canne plantée en Martinique

Paramètres :

Cultivars : B5992
 B69566
 B8008
 B82333
 R570

Zones : Lamentin
 Rivière Pilote
 Saint-Pierre
 Sainte-Luce
 Trinité

Quadrats : Intérieur
 Extérieur

Nombre d'observations utilisées : 30

Analyse de variance

Tableau 8-1. Analyse de variance sur les moyennes de contaminations par le SCYLV en canne plantée en Martinique

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cultivar	4	0,751	0,188	2,32	0,092
zone	4	0,927	0,232	2,86	0,050
quadrat	1	0,013	0,0130	0,16	0,693

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Comparaison de moyennes par le test t

Tableau 8-2. Moyennes des contaminations par le SCYLV des zones de Martinique après transformation arc sinus

Zone	Arc sinus (moyenne)
Lamentin	0,993
Rivière Pilote	0,046
Saint Pierre	1,130
Sainte Luce	0,286
Trinité	0,327

Tableau 8-3. Probabilité d'égalité des moyennes de contaminations par le SCYLV par zone en Martinique

	Lamentin	Rivière Pilote	Saint Pierre	Sainte Luce	Trinité
Lamentin	.	0,019	0,504	0,011	0,032
Rivière Pilote	0,019	.	0,018	0,486	0,240
Saint Pierre	0,504	0,018	.	0,017	0,034
Sainte Luce	0,011	0,486	0,017	.	0,870
Trinité	0,032	0,240	0,034	0,870	.

Annexe 9: Analyse statistique sur les intensités des populations de *M. sacchari* en canne plantée en Martinique

Paramètres

Cultivars : B5992
B69566
B8008
B82333
R570
Zones : Lamentin
Rivière Pilote
Saint-Pierre
Sainte-Luce
Trinité

Analyse de variance :

Tableau 9-1. Analyse de variance sur les moyennes des intensités des populations de *M. sacchari* en canne plantée en Martinique

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cultivar	4	0,407	0,102	0,99	0,465
zone	4	1,356	0,339	3,30	0,071

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Comparaison de moyennes par le test t

Tableau 9-2. Moyennes des contaminations par le SCYLV des cultivars et des zones de Martinique après transformation racine carrée

Cultivar	moyenne (note)	zone	moyenne (note)
B5992	0,424	Lamentin	1,518
B69566	0,603	Rivière Pilote	0,447
B8008	1,032	Sainte Luce	1,026
B82333	1,387	Saint Pierre	0,651
R570	0,824	Trinité	0,630

Tableau 9-3. Probabilité d'égalité des moyennes de contaminations par le SCYLV par cultivar en Martinique

	B5992	B69566	B8008	B82333	R570
B5992	.	0,591	0,160	0,040	0,338
B69566	0,591	.	0,422	0,161	0,674
B8008	0,160	0,422	.	0,301	0,534
B82333	0,040	0,161	0,301	.	0,117
R570	0,338	0,674	0,534	0,117	.

Tableau 9-4. Probabilité d'égalité des moyennes de contaminations par le SCYLV par zone en Martinique

	Lamentin	Rivière Pilote	Sainte Luce	Saint Pierre	Trinité
Lamentin	.	0,068	0,163	0,027	0,054
Rivière Pilote	0,068	.	0,286	0,742	0,583
Sainte Luce	0,163	0,286	.	0,432	0,343
Saint Pierre	0,027	0,742	0,432	.	0,968
Trinité	0,054	0,583	0,343	0,968	.

Annexe 10 : Analyse statistique sur les contaminations par le SCYLV en canne plantée (CP) et en repousse (R1) en Martinique

Paramètres :

Cultivars : B5992
B69566
B8008
B82333
R570

Zones : Lamentin (L)
Rivière Pilote (RP)
Saint-Pierre (SP)
Sainte-Luce (SL)
Trinité (T)

Nombre d'observations utilisées : 12

Analyse de variance

Tableau 10-1. Analyse de variance sur les moyennes de contamination par le SCYLV en canne plantée en Martinique

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cultivar (zone)	5	0,962	0,192	5,78	0,027

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Tableau 10-2. Analyse de variance sur les moyennes de contamination par le SCYLV en repousse en Martinique

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cultivar (zone)	5	1,395	0,279	3,98	0,061

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Comparaison de moyennes par le test t

Tableau 10-3. Moyennes des contaminations par le SCYLV après transformation arc sinus en Martinique

Zone	Arc sinus (moyenne CP)	Arc sinus (moyenne R1)
B5992 Lamentin	1,135	1,420
B69566 Lamentin	0,579	0,526
B8008 Rivière Pilote	0,415	0,803
B69566 Saint Pierre	0,689	0,510
B5992 Sainte Luce	0,427	0,504
R570 Trinité	0,247	0,449

Tableau 10-4. Probabilité d'égalité des moyennes de contaminations en canne plantée en Martinique

CP	B5992 L	B69566 L	B8008 RP	B69566 SP	B5992 SL	R570 T
B5992 L	.	0,023	0,008	0,050	0,008	0,003
B69566 L	0,023	.	0,405	0,568	0,439	0,119
B8008 RP	0,008	0,405	.	0,185	0,950	0,391
B69566 SP	0,050	0,185	0,185	.	0,202	0,052
B5992 SL	0,008	0,950	0,950	0,202	.	0,360
R570 T	0,003	0,391	0,391	0,052	0,360	.

Tableau 10-5. Probabilité d'égalité des moyennes de contaminations en repousse en Martinique

	B5992 L	B69566 L	B8008 RP	B69566 SP	B5992 SL	R570 T
B5992 L	.	0,0149	0,0583	0,0138	0,0134	0,0105
B69566 L	0,0149	.	0,3365	0,9533	0,9353	0,7818
B8008 RP	0,0583	0,3365	.	0,3113	0,302	0,2305
B69566 SP	0,0138	0,9533	0,3113	.	0,982	0,8267
B5992 SL	0,0134	0,9353	0,302	0,982	.	0,8443
R570 T	0,0105	0,7818	0,2305	0,8267	0,8443	.

Analyse de variance en mesures répétées

Tableau 10-6. Analyse de variance sur les moyennes de contaminations par le SCYLV en mesures répétées en Martinique

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cycle	1	0,08636465	0,08636465	12,42	0,0125
cycle*cultivar	5	0,22689309	0,04537862	6,53	0,0204

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Annexe 11 : Analyse statistique sur les contaminations par le SCYLV et les colonisations par *M. sacchari* en canne plantée et en repousse en Guadeloupe et Martinique

Paramètres :

Cultivars : B5992
B69566
R570

Îles : Guadeloupe (Gp)
Martinique (Mq)

Analyse de variance

Tableau 19-1. Analyse de variance des contaminations par le SCYLV de Martinique et de Guadeloupe.

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p critique
île	1	51,651	51,651	32,09	0,000
cultivar	2	19,392	9,696	6,02	0,008
île*cultivar	2	11,243	5,622	3,49	0,047

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Tableau 11-2. Analyse de variance des colonisations par *M. sacchari* en Martinique et en Guadeloupe

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
île	1	1,174	1,174	0,55	0,465
cultivar	2	5,102	2,551	1,19	0,317
île*cultivar	2	4,865	2,432	1,14	0,334

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Tableau 11-3. Analyse de variance sur les contaminations par le SCYLV en repousse en Martinique et en Guadeloupe

R1

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cultivar	2	1,021	0,510	5,76	0,014
île	1	1,047	1,047	11,81	0,004
île*cultivar	2	0,043	0,021	0,24	0,788

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Comparaison de moyennes par le test tTableau 11-4. Moyennes des contaminations par le SCYLV et des colonisations par *M. sacchari* des cultivars de Martinique et de Guadeloupe après transformation arc sinus

Cultivar	île	Arc sinus (vecteur)	Arc sinus (virus)
B5992	Guadeloupe	-0,223	0,289
B69566	Guadeloupe	0,782	0,020
R570	Guadeloupe	-0,711	0,109
B5992	Martinique	0,459	0,708
B69566	Martinique	-0,290	0,634
R570	Martinique	0,221	0,247

Tableau 11-5. Probabilité d'égalité des moyennes de contamination par le SCYLV des cultivars en Martinique et en Guadeloupe

	B5992 Gp	B69566 Gp	R570 Gp	B5992 Mq	B69566 Mq	R570 Mq
B5992 Gp	.	0,005	0,012	0,006	0,020	0,672
B69566 Gp	0,005	.	0,173	0,000	0,000	0,049
R570 Gp	0,012	0,173	.	0,000	0,000	0,222
B5992 Mq	0,006	0,000	0,000	.		0,022
B69566 Mq	0,020	0,001	0,000	0,789	.	0,042
R570 Mq	0,672	0,049	0,222	0,022	0,042	.

Tableau 11-6. Probabilité d'égalité des moyennes de colonisation par *M. sacchari* des cultivars en Martinique et en Guadeloupe

Puceron	B5992 Gp	B69566 Gp	R570 Gp	B5992 Mq	B69566 Mq	R570 Mq
B5992 Gp	.	0,213	0,471	0,419	0,947	0,704
B69566 Gp	0,213	.	0,050	0,719	0,308	0,642
R570 Gp	0,471	0,050	.	0,143	0,659	0,411
B5992 Mq	0,419	0,719	0,143	.	0,488	0,847
B69566 Mq	0,947	0,308	0,659	0,488	.	0,705
R570 Mq	0,704	0,642	0,411	0,847	0,705	.

Analyse de variance en mesures répétées

Tableau 11-7. Analyse de variance sur les moyennes de contaminations par le SCYLV en mesures répétées en Martinique et en Guadeloupe

Paramètre	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p
cycle	1	0,064	0,064	13,15	0,003
cycle*cultivar	2	0,090	0,045	9,27	0,002
cycle*île	1	0,000	0,000	0,05	0,823
cycle*cultivar*île	2	0,033	0,0167	3,43	0,059

DDL= degré de liberté, F= statistique de Fisher, p=probabilité critique

Annexe 12 : Analyse de variance sur les colonisations des trois cultivars par *M. sacchari*Comparaison des moyennes par le test tTableau 102. Probabilité d'égalité des moyennes de colonisation par *M. sacchari* de trois cultivars à six dates

	Semaine 7			Semaine 10			
	B5992	R570	SP71-6163	B5992	R570	SP71-6163	
B5992	.	0,8964	0,8383	B5992	.	0,8261	1,0984
R570	0,8964	.		R570	0,4128	.	
SP71-6163	0,8383	0,9401	.	SP71-6163	0,2775	0,7831	.

	Semaine 13			Semaine 16			
	B5992	R570	SP71-6163	B5992	R570	SP71-6163	
B5992	.	0,2150	0,1854	B5992	.	0,2512	0,9403
R570	0,2150	.		R570	0,2512	.	
SP71-6163	0,1854	0,9297	.	SP71-6163	0,9403	0,2153	.

	Semaine 18			Semaine 25			
	B5992	R570	SP71-6163	B5992	R570	SP71-6163	
B5992	.	0,0318	0,5564	B5992	.	0,0013	0,0914
R570	0,0318	.		R570	0,0013	.	
SP71-6163	0,5564	0,1068	.	SP71-6163	0,0914	0,0935	.

LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Communications dans des conférences internationales :

Daugrois, J.-H., Edon-Jock, C., Fernandez, E., Girard, J.-C., Rott, P., 2008: Statuses of sugar cane yellow leaf disease in the French West Indies and in other islands of the Caribbean. West Indies Sugar Technologists, XXIX conference, April 21-25, Montego Bay, Jamaica.

Girard, J.-C., Fernandez, E., Royer, M., Edon-Jock, C., Abu Ahmad, Y., Daugrois, J.-H., Rott, P., 2007. Impact of genetic diversity of /Sugarcane yellow leaf virus/ on diagnosis of sugarcane yellow leaf and germplasm movement. /In /Abstracts of the International Conference on Emerging and Re-Emerging viral diseases in the Tropics and Sub-Tropics, December 11-14, 2007, New Dehli-110012, India, p. 143

Edon-Jock, C., Rott, P., Vaillant, J., Fernandez, E., Girard, J.-C., and Daugrois, J.-H., 2007: Status of *Sugarcane yellow leaf virus* in commercial fields and risk assessment in Guadeloupe., *In* Proceedins of International Society of Sugar Cane Technologists, Vol. 26, 2007.

Edon, C., Sauvion, N., Vaillant, J., and Daugrois, J.-H., 2006: Spatiotemporal evolution of plant infection by SCYLV in a disease free sugarcane plot. Toward modeling virus spread in tropical conditions. *In* abstracts of Internationnal Society of Sugar Cane Technologists workshop, 23-27 january 2006, Petit-Bourg, Guadeloupe.

Vaillant, J., Jacquet, O., Troupé, M., and Edon, C., 2006: Mathematical modelling of within field propagation of a disease and its insect vector. 23rd International Biometric Conference, Montreal.

Jacquet, O., Vaillant, J., Troupe, M., Edon, C., 2006. Statistique d'un modèle de propagation virale par interaction plante-vecteur. 38èmes Journées De Statistique, Clamart, France.

Jacquet, O., Edon, C., Vaillant, J., Daugrois, J.-H., 2006. Statistical study of Spatio-temporal evolution of plant infection by SCYLV in a disease free plot. *In* proceedings of the Caribbean Academy of Sciences 2006 Conference – 15th Annual Meeting & Conference, The Guadeloupe Chapter of the Academy, Le Gosier, Guadeloupe.

Vaillant, J., Troupé, M., Jacquet, O., et Edon, C., 2005 : Traitement MCMC d'un modèle d'infection spatio-temporel. SSIA05, Statistique des processus, Angers.

Les premiers symptômes de la maladie de la feuille jaune de la canne à sucre ont été observés en 1988 à Hawaï. Parallèlement, des chutes de rendement sur une variété présentant les mêmes symptômes ont été constatées au Brésil en 1990. C'est en 1996, que le *Sugarcane Yellow Leaf Virus* (SCYLV) a été identifié comme l'agent causal de cette maladie. Ce virus appartient au genre *Polerovirus* de la famille des *Luteoviridae*. Ces derniers sont transmis à la plante hôte uniquement par l'intermédiaire de pucerons vecteurs selon le mode circulant persistant et non multipliant. La maladie peut également être propagée par la plantation de boutures obtenues à partir de tiges infectées par le virus. Les études menées depuis 2001 en Guadeloupe ont permis de recenser un seul vecteur efficace du SCYLV, *M. sacchari*. Les trois génotypes du SCYLV pouvant être différenciés par Reverse Transcriptase-Polymerase Chain Reaction ont été identifiés sur les parcelles de collection du Centre International pour la Recherche Agronomique et le Développement en Guadeloupe.

Le but de cette étude est d'étudier la répartition du SCYLV et de son vecteur principal, *M. sacchari*, en fonction des différents bassins canniers et des cultivars de canne à sucre, de caractériser les complexes parasitaires (génotypes du SCYLV/isolats de pucerons/cultivars) présents en Guadeloupe et en Martinique, et de décrire un modèle de contamination des parcelles de canne à sucre en tenant compte de la dissémination du virus par le vecteur.

Nous avons analysé l'infection par le SCYLV et les populations *M. sacchari* de 47 et 17 parcelles en canne plantée des cinq principaux cultivars de Guadeloupe et des cinq principaux cultivars de Martinique respectivement. Parmi ces parcelles, 21 en Guadeloupe et douze en Martinique ont été analysées en première repousse. De plus, l'incidence du virus dans cinq parcelles de pépinières secondaires et tertiaires de Guadeloupe a été déterminée. Deux cent à 400 échantillons de feuilles par parcelle ont été testés par immuno-empreinte afin de détecter le virus. La présence des pucerons de l'espèce *M. sacchari* a été déterminée sur 10% des plants échantillonnés. Les génotypes du SCYLV ont été identifiés dans les échantillons de onze parcelles infectées en Guadeloupe et dans 15 parcelles infectées en Martinique (une parcelle par cultivar par zone autant que possible). De plus, à des fins de modélisation, une parcelle constituée de 1643 plants sains du cultivar sensible SP71-6163 a été suivie quand à la présence du virus et du puceron vecteur. De même dans le but de comparer les cultivars locaux B5992 et R570 au cultivar sensible SP71-6163 deux parcelles ont été plantées avec des plants sains issus de culture in vitro. Le SCYLV et *M. sacchari* étaient présents dans tous les cultivars des deux îles et sur l'ensemble des zones de culture. En Guadeloupe, l'incidence du virus dans les parcelles de canne plantée était 6,4%, et variait de 0 à 21% en fonction du cultivar et des zones de culture. L'incidence du virus augmente pour atteindre 10,2% en première repousse, et augmente dans tous les cultivars sauf B69566. Le cultivar B69566 présente toujours les plus faibles taux d'infection par le SCYLV, tandis que le cultivar R579 présente les plus forts taux d'infection. L'incidence du SCYLV varie de 2,5 à 17,3% dans les pépinières secondaires. Cependant, elle n'augmente pas dans les pépinières tertiaires issues des pépinières secondaires. Le génotype REU a été identifié dans toutes les parcelles commerciales, tandis que les génotypes BRA-PER et CUB étaient présents dans peu d'échantillons provenant de cinq parcelles.

En Martinique, l'incidence du SCYLV était 31,6% en canne plantée, et varie de 7 à 82% en fonction du cultivar et des zones de cultures de même qu'en Guadeloupe. L'incidence moyenne du virus a atteint 36,6% en première repousse, et a augmenté en première repousse pour tous les cultivars excepté pour B69566, où elle a diminué. Seuls les génotypes BRA-PER et REU ont été identifiés en Martinique, et quasiment tous les échantillons étaient infectés par le génotype BRA-PER. Une seule feuille était infectée par le génotype REU et les génotypes BRA-PER et REU co-existaient dans deux échantillons. L'analyse d'une parcelle saine à la plantation nous a permis de caractériser la dispersion du SCYLV à partir de sources extérieures et intérieures à la parcelle : l'infection est aléatoire dans une première phase puis se disperse localement de plante à plante. Cette étude nous a conduits à proposer un modèle comme outil de description et de prédiction de la dissémination du SCYLV par *M. sacchari*.

Les cultivars locaux B5992 et R570 ont été contaminés moins vite que le cultivar sensible SP71-6163, cependant ces deux cultivars ne sont pas différents l'un de l'autre.

En Guadeloupe et en Martinique, le SCYLV semble être disséminé à la fois par les pucerons vecteurs et par la plantation de boutures infectées. La présence d'un génotype majoritaire sur chaque île suggère que ce génotype était plus adapté à l'environnement, ou que les autres ont été récemment introduits et ne se seraient pas encore répandus sur l'île. Les différences importantes dans l'incidence du SCYLV ainsi que dans la fréquence des génotypes entre les deux îles suggèrent de puissantes interactions locales à déterminer. Par conséquent, la progression de la maladie sur une île ne peut être prédite en fonction de la situation d'une autre île proche. La maladie de la feuille jaune doit donc être étudiée localement afin de déterminer le risque épidémique et l'impact sur la production de canne à sucre.

Symptoms of Sugarcane yellow leaf disease were first observed in 1988 in Hawaii. Meanwhile, yield losses on a cultivar exhibiting the same symptoms were found in Brazil in 1990. The Sugarcane Yellow Leaf Virus (SCYLV) has been identified as the casual agent of this disease in 1996. This virus is a member of the genus *Polerovirus* of the family *Luteoviridae*. The viruses of this family are transmitted to the plant by aphid vectors in a circulative persistent and non replicative manner. Yellow leaf can also be spread when planting cuttings obtained from infected stalks. *Melanaphis sacchari* was the only vector of SCYLV observed during the studies conducted since 2001 in Guadeloupe. The three genotypes of SCYLV which can be differentiated by Reverse Transcriptase-Polymerase Chain Reaction were found on collection plots of the Centre International pour la Recherche Agronomique et le Développement in Guadeloupe.

The aims of this study were to study the SCYLV distribution and its vector, *M. sacchari*, according to the different geographical locations and sugarcane cultivars, to characterize the different combination of SCYLV genotypes/aphid populations/cultivars present in Guadeloupe and Martinique and to model description of the sugarcane plots contamination, taking into account the spread of the virus by the vector.

The five principal sugarcane cultivars located in 47 plant cane fields in Guadeloupe and the five principal sugarcane cultivars located in 15 plant cane fields in Martinique were analyzed for virus infection and populations of *M. sacchari*. Twenty one of the 47 fields and 15 of the 17 fields were also analyzed in the first ratoon crop. In addition, virus incidence in five fields of second and third propagations of nursery stocks was determined. Depending on the size of the field, 200 to 400 leaf samples per field were tested by tissue blot immunoassay to detect the virus, and presence of aphids was determined on 10% of sampled plants. The SCYLV genotypes were determined in the eleven infected plots in Guadeloupe and in 13 infected plots in Martinique (one plot per cultivar and per area as possible).

Additionally, a disease free plot of 1,643 plants of the susceptible cultivar SP71-6163 was planted. All plants were tested by tissue blot immunoassay to detect the virus, and vector population was observed at different dates.

Furthermore, two disease free plots of susceptible cultivar SP71-6163 and local cultivars B5992 and R570 were tested by tissue blot immunoassay to detect the virus, and vector population was observed at different dates.

The SCYLV and its vector *M. sacchari* were widespread in all areas and all cultivars of the two islands. In Guadeloupe, the mean virus incidence in plant cane crops was 6.4%, and it ranged from 0% to 21% according to cultivar and growing areas. The mean virus incidence increased to 11.2% in the first ratoon crop, and it increased in all cultivars except in cultivar B69566. Cultivar B69566 consistently had the lowest virus incidence, whereas virus incidence was consistently high in cultivar R579. In the second stage nursery fields, virus incidence ranged from 2.5% to 17.3%. Overall, virus incidence did not increase in the third stage nursery step that derived from the second stage nurseries. Genotype REU was found in all commercial fields, whereas genotypes BRA-PER and CUB were found only in a few samples from five fields.

In Martinique, the mean virus incidence was 31.6% in plant cane crops, and it ranged from 7% to 82% according to cultivar and growing areas as in Guadeloupe. The mean virus incidence increased to 36.6% in the first ratoon crop, and it increased in all cultivars except in cultivar B69566 where it decreased. Only the genotypes BRA-PER and REU were identified in Martinique, and almost all samples were infected by genotype BRA-PER. One sample was infected by genotype REU only, and a co-infection of genotypes BRA-PER and REU was detected in two samples.

The analysis of the disease free plot permits us to characterize virus spread from outside field sources and from inside field sources: in a first phase, infection appears to be completely random, and in a second phase, spreads locally from one plant to another. This study allowed us to propose a model as a tool for describing and forecasting the SCYLV spread by *M. sacchari*.

Local cultivars B5992 and R570 were more resistant and slowly contaminated than susceptible cultivar SP71-6163. But no difference was found between these two cultivars.

In Guadeloupe and Martinique, the SCYLV appears to be spread by aphid vectors and infected cuttings. The presence of a major virus genotype suggested that this genotype was more adapted to the local environment, or that the two other genotypes were only recently introduced and have not spread yet on the island. Large differences in disease incidence and frequency of virus genotypes between the two locations suggested the occurrence of strong local effects or interactions that need to be determined. Therefore, disease progress in one location can so far not be predicted based on the situation in another relatively close location. The status of yellow leaf disease must be studied locally to determine the risk of yellow leaf epidemics and impact on sugarcane production.