

Virus et vigne, un mariage difficile à défaire : la biovigilance est nécessaire plus que jamais

Virus and grapevine, unbreakable relationship: Biovigilance is more than require

Issam E. Ben Moussa, Pierre Lemoyne et Mamadou L. Fall

Volume 99, numéro 1, 2019

Reçu 2019-01-09; accepté 2019-02-27

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1059305ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1059305ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Société de protection des plantes du Québec (SPPQ)

ISSN

1710-1603 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Ben Moussa, I. E., Lemoyne, P. & Fall, M. L. (2019). Virus et vigne, un mariage difficile à défaire : la biovigilance est nécessaire plus que jamais. *Phytoprotection*, 99(1), 15–20. <https://doi.org/10.7202/1059305ar>

Résumé de l'article

La viticulture est l'une des industries les plus largement établies dans le monde. Au Canada, après l'Ontario et la Colombie-Britannique, c'est au tour du Québec de connaître une intensification de la viticulture. Or, plusieurs contraintes sont et seront associées à cette intensification. La vigne est une plante vivace caractérisée par une croissance indéfinie impliquant une disponibilité continue de tissus tendres et éventuellement une susceptibilité aux insectes et maladies. Depuis ses origines, la vigne a évolué en constante dualité avec les virus. Plus de 60 virus sont actuellement associés à la vigne à l'échelle mondiale, dont la majorité des virus sont pathogènes, pouvant réduire la vigueur et la productivité des vignes ou la qualité des raisins. Au Québec, la dernière enquête qui fait état des virus dans les vignobles date des années 1990. Cette enquête a révélé la présence de deux virus pathogènes de la vigne alors que l'ensemble des virus présents dans les vignobles du Québec restent toujours à définir. Ce manquement de connaissance est sans doute l'un des facteurs qui expliquent l'inefficacité des stratégies de lutte contre les viroses de la vigne. Ces stratégies reposent essentiellement sur la prévention et sur des programmes de certification du matériel viticole en ciblant des virus connus et détectables. Dans cet article, nous évoquons les lacunes associées à l'état des virus de la vigne au Québec et nous expliquons comment un programme de biovigilance peut aider à mitiger les menaces et assurer une lutte efficace contre les viroses de la vigne.

Virus et vigne, un mariage difficile à défaire : la biovigilance est nécessaire plus que jamais

Issam E. Ben Moussa^{1,2}, Pierre Lemoyne¹ et Mamadou L. Fall¹✉

Reçu 2019-01-09; accepté 2019-02-27

PHYTOPROTECTION 99 : 15-20

La viticulture est l'une des industries les plus largement établies dans le monde. Au Canada, après l'Ontario et la Colombie-Britannique, c'est au tour du Québec de connaître une intensification de la viticulture. Or, plusieurs contraintes sont et seront associées à cette intensification. La vigne est une plante vivace caractérisée par une croissance indéfinie impliquant une disponibilité continue de tissus tendres et éventuellement une susceptibilité aux insectes et maladies. Depuis ses origines, la vigne a évolué en constante dualité avec les virus. Plus de 60 virus sont actuellement associés à la vigne à l'échelle mondiale, dont la majorité des virus sont pathogènes, pouvant réduire la vigueur et la productivité des vignes ou la qualité des raisins. Au Québec, la dernière enquête qui fait état des virus dans les vignobles date des années 1990. Cette enquête a révélé la présence de deux virus pathogènes de la vigne alors que l'ensemble des virus présents dans les vignobles du Québec restent toujours à définir. Ce manque de connaissance est sans doute l'un des facteurs qui expliquent l'inefficacité des stratégies de lutte contre les viroses de la vigne. Ces stratégies reposent essentiellement sur la prévention et sur des programmes de certification du matériel viticole en ciblant des virus connus et détectables. Dans cet article, nous évoquons les lacunes associées à l'état des virus de la vigne au Québec et nous expliquons comment un programme de biovigilance peut aider à mitiger les menaces et assurer une lutte efficace contre les viroses de la vigne.

Mots clés : stratégies d'atténuation, virus de la vigne, biovigilance, programme de certification.

[Virus and grapevine, unbreakable relationship: Biovigilance is more than require]

Grapevine is one of the most widely grown fruit crops in the world. In Canada, following Ontario and British Columbia, it is Quebec's turn to promote viticulture. However, several constraints are and will be associated with this intensification. Worldwide, over 60 different viruses can infect grapevines and may impact their vigour, productivity and the quality of grapes. In Quebec, the last survey on grapevine viruses was performed during the 90s which revealed the presence of two pathogenic viruses. However, no study was conducted to identify grapevine virome including pathogenic and beneficial viruses. This was probably due to the lack of molecular tools for detection and identification. In this paper, we highlight the grapevine viruses knowledge gaps in Quebec. Based on recent progress in omic-techniques and risk prediction tools, we explain how a biovigilance framework could lead to mitigate potential viral threats and how it can provide an efficient control for grapevine viral diseases present in the territory.

Keywords: mitigation strategies, grapevine virus, biovigilance, certification programme.

1. Centre de recherche et de développement de Saint-Jean-sur-Richelieu, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Saint-Jean-sur-Richelieu, QC, Canada, J3B 3E6. Auteur de correspondance : mamadoulamine.fall@canada.ca.
2. Département de Biologie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, J1K 2R1.

INTRODUCTION

La vigne (*Vitis spp.*) est l'une des cultures fruitières les plus largement établies dans le monde, sur 7,5 millions d'hectares, avec une production totalisant 73,3 millions de tonnes de raisins (International Organisation of Vine and Wine [IOV] 2018). Parmi environ 60 espèces de vigne, *Vitis vinifera* L. est l'espèce la plus distribuée dans le monde et dont la production est destinée principalement à l'industrie du vin et au marché des raisins de table. Cependant, les produits à fortes valeurs ajoutées comme le vinaigre et l'huile à base de pépins de raisins sont de plus en plus convoités (IOV 2018; Reynolds 2017). La viticulture continue toujours de grossir dans le monde et plus remarquablement dans les pays avec une jeune industrie comme le Canada, mais ceci ne se fera pas sans contraintes. En effet, depuis ses origines, la vigne a évolué en constante dualité avec une diversité de virus qui ont façonné sa génétique (Martelli 2017). Ce mariage entre les virus et la vigne semble dater du Néolithique. En toute vraisemblance, le virus du court-noué serait présent au sud de l'Italie (Pompei) et dans le premier vignoble de la région qui est devenue aujourd'hui la Syrie, l'Iraq et la Turquie (Hewitt 1968). Assumant que les virus sont transmissibles par propagation végétative et par des vecteurs (c.-à-d. nématodes et arthropodes) qui devraient coexister dans l'écosystème, on a déduit que les virus de la vigne ont été transmis dans toute la région méditerranéenne qui a connu une grande évolution de la viticulture durant le Néolithique. Dans ce même contexte, certains historiens ont évoqué la possibilité que les virus qui existaient dans les vignobles de l'Empire romain, y compris le virus du court-noué, aient ainsi été transportés vers l'Empire britannique, la France, l'Allemagne et éventuellement les Amériques. D'autre part, les travaux en phylogénie de la vigne nous montrent que le génome du clone « Pinot noir » incorpore des séquences d'ADN provenant de six différents pararétrovirus, dont la plupart appartiennent au genre *Caulimovirus* (Bertsch *et al.* 2009). Depuis la première identification et caractérisation du virus du court-noué il y a 60 ans, approximativement 70 espèces de virus appartenant à différents groupes (17 familles et 27 genres) ont été documentées sur la vigne. Malgré que la majorité de ces virus aient une importance économique, car ils sont pathogènes et sont responsables des maladies complexes comme la dégénérescence infectieuse, l'enroulement foliaire et le bois rugueux, certains peuvent interagir positivement avec la vigne (Perrone *et al.* 2017). Toutefois, la diversité des phytovirus reste peu étudiée à l'échelle mondiale et particulièrement au Canada. En effet, plusieurs phytovirus (pathogènes, bénéfiques et neutres) associés à la vigne restent à être identifiés et leurs interactions avec la plante restent à être étudiées.

LES MALADIES DE LA VIGNE CAUSÉES PAR DES VIRUS ET LEUR DISTRIBUTION AU CANADA

Plus de 60 virus s'attaquent à la vigne dans le monde, pouvant réduire la vigueur et la productivité des vignes ou la qualité des raisins (Martelli 2014a; Martelli 2014b; Yepes *et al.* 2018). La vigne abrite ainsi le plus grand nombre de virus documentés qu'aucune autre culture pérenne. Dans le nord-est de l'Amérique du Nord, les virus récurrents sont le virus de la tache annulaire de la tomate (ToRSV), le virus de la mosaïque de l'arabette (ArMV), les virus associés à

l'enroulement foliaire (GLRaV), le virus A (GVA), le virus B (GVB), le virus D (GVD), le virus de la marbrure (GFkV), le virus associé au bois strié chez le porte-greffe Rupestris (RSpaV), la souche virale GLRaV-2 qui s'attaque au raisin Red Globe (GLRaV2-RG), le virus du court-noué (GFLV) et les virus associés à la tache rouge (GRBaV) (Martelli 2014a). Parmi ces virus, deux virus réémergents (GLRaV, ToRSV) et un virus récemment identifié (GRBaV) inquiètent de plus en plus les viticulteurs.

L'enroulement de la vigne (*Grapevine leafroll disease*) est une maladie de grande importance économique comparativement à plusieurs maladies fongiques de la vigne (Naidu *et al.* 2008). Cette maladie est causée par un complexe de virus à ARN monocaténaire de la famille des Closteroviridae. Selon diverses estimations aux États-Unis, les pertes économiques sur 25 ans dans certains cépages greffés varieraient de 25 000 \$ à 40 000 \$ l'hectare (Atallah *et al.* 2012; Naidu *et al.* 2014). La propagation de cette maladie ancienne serait principalement attribuable au commerce de matériel de multiplication depuis les « vieux pays » (Syrie, Iraq, Yémen et Turquie) vers le reste des territoires où la maladie est actuellement présente (Maree *et al.* 2013). En raison des degrés variables de décoloration foliaire qu'elle provoque, la virose a été mal identifiée à la fin du 19^e siècle, méprise pour un désordre physiologique nommé « rougeau » en France et « rossore » en Italie (Maree *et al.* 2013; Pacottet 1906; Ravaz et Roos 1905). Dans les cépages rouges, la décoloration rougeâtre des feuilles à l'exception des nervures qui restent vertes et l'enroulement des feuilles vers le bas sont les principaux symptômes de la maladie. Tandis que dans les cépages blancs, un léger jaunissement des feuilles entre les nervures avec ou sans enroulement des feuilles sont observés (Adiputra *et al.* 2018). Cependant, les symptômes sont peu fiables pour le dépistage de l'enroulement de la vigne. En Amérique du Nord, la présence initiale de l'enroulement foliaire au début du 20^e siècle avait été associée à la propagation de la maladie du phylloxera (causée par *Daktulosphaera vitifoliae* – Homoptera : Phylloxeridae, un insecte indigène de l'est de l'Amérique du Nord) (Luhn et Goheen 1970). Or, l'enroulement de la vigne était présent dans des pays (Yémen, Chypre, Chine) qui cultivent la vigne depuis des siècles, mais qui n'avaient pas encore rapporté la présence du phylloxera. À la fin des années 1900, il fut démontré que des cochenilles pouvaient transmettre la maladie (Martin *et al.* 2005; Naidu *et al.* 2014). Dans l'État de New York, où la maladie est présente, on étudie des moyens de lutte chimiques contre la cochenille *Pseudococcus maritimus* de la famille des Pseudococcidae (Wallingford *et al.* 2015).

Au Canada, une enquête nationale menée dans les vignobles en 1994 et en 1995 a révélé des différences marquées de l'incidence globale des virus GLRaV entre les provinces, soit des taux respectifs de 12,2 %, de 2,1 %, de 5,1 % et de 1,7 % en Ontario, en Colombie-Britannique, au Québec et en Nouvelle-Écosse (Mackenzie *et al.* 1996). Près de vingt ans plus tard, des enquêtes subséquentes indiquaient encore la présence de la maladie dans des vignobles de l'Ontario et de la Colombie-Britannique (McFadden-Smith *et al.* 2014).

La tache rouge (*Grapevine red blotch disease*) est une nouvelle maladie de la vigne qui a d'abord été décrite en Californie en 2008. Ses agents pathogènes ont été isolés dans des vignes malades pour la première fois en 2012 (Sudarshana *et al.* 2015). La maladie a été confondue avec l'enroulement viral en raison des symptômes de décoloration foliaire qu'elle provoque en fin de saison (Krenz *et al.* 2014). Les symptômes de la tache rouge sont très semblables à ceux

de l'enroulement. Il est très difficile de dissocier ces deux maladies sur la base d'un diagnostic visuel. La tache rouge serait associée à diverses espèces de virus à ADN monocaténaire de la famille des *Germiniviridae*, dont la présence est limitée au phloème (Martelli 2014a; Martelli 2014b; Naidu *et al.* 2014; Sudarshana *et al.* 2015). Ces virus semblent réduire le rendement de certains cépages; il a été démontré que les lectures Brix des jus extraits de raisins de vignes malades étaient réduites de 1 à 4 degrés comparativement à celles des jus de raisins issus de vignes asymptomatiques, dans différents cépages (Ricketts *et al.* 2017; Sudarshana *et al.* 2015). La présence de la tache rouge a été rapportée dans de nombreux États américains, notamment en Californie, au Maryland, dans l'État de New York, au New Jersey et en Oregon, ainsi que dans deux provinces canadiennes, soit en Colombie-Britannique et en Ontario (Sudarshana *et al.* 2015). Une récente enquête sur l'incidence et la distribution des virus dans les vignobles de la Colombie-Britannique a détecté le virus de la tache rouge dans 1,6% des échantillons colligés (Poojari *et al.* 2017). Jusqu'à présent, ces virus n'ont pas été rapportés au Québec, et l'on ignore leur origine, car aucun rapport ne fait état de leur présence à l'extérieur de l'Amérique du Nord (Sudarshana *et al.* 2015). Quoi qu'il en soit, avec le commerce extensif de matériel de multiplication, ces virus sont sans doute présents dans d'autres régions viticoles du monde, y compris au Québec. En fait, les virus GRBaV peuvent être transmis par greffage et ont été trouvés dans des vignes greffées et d'autres vignes franches de pied (Al Rwahnih *et al.* 2013; Krenz *et al.* 2014; Sudarshana *et al.* 2015). Les motifs agrégés observés sur les feuilles de vignes infectées donnent à penser qu'un vecteur est impliqué dans la transmission de la maladie. Il a été démontré, dans des conditions contrôlées, que la cicadelle de la vigne vierge (*Erythroneura ziczac* – Homoptera : Cicadellidae) pouvait transmettre les virus GRBaV (Poojari *et al.* 2013).

La dégénérescence infectieuse de la vigne est une très ancienne maladie de la vigne. Elle figure parmi les viroses les plus répandues et les plus dommageables et touche des vignobles du monde entier. Elle est causée par un complexe viral regroupant divers népovirus qui ont un large éventail de plantes hôtes, dont le virus du court-noué (GFLV), le virus de la tache annulaire de la tomate (ToRSV), le virus de la marbrure du bleuétier (BLMoV), le virus de la mosaïque de l'arabette (ArMV) et le virus de la tache annulaire du tabac (TRSV) (Martelli 2014a; Martelli 2014b; Martelli et Boudon-Padieu 2006). Les ravages causés par ce complexe viral varient selon les cépages, les virus impliqués et les conditions climatiques (Martelli 2014a). En général, la maladie se manifeste par des symptômes foliaires, comme des feuilles en éventail ou des taches annulaires chlorotiques, ainsi que par une perte importante de la vigueur des vignes, dans l'année de l'infection. Elle cause des pertes de rendement qui peuvent aller jusqu'à 80 % (Lunden *et al.* 2010). La maladie a été décrite pour la première fois en Europe en 1841 et est maintenant répandue aux États-Unis, notamment dans les États de la Californie, Washington, New York, Maryland et au Missouri, et au Canada dans la province de l'Ontario (Martelli 2014a, Martelli 2014b). Même si elle n'a pas encore été signalée au Québec et en Colombie-Britannique, la présence de népovirus, comme le GFLV et l'ArMV, a été documentée dans ces provinces (Mackenzie *et al.* 1996). Ces virus sont transmissibles par greffage et par inoculation mécanique (Martelli 2014a; Martelli 2014b). La plupart des virus associés à la dégénérescence infectieuse sont des virus polyédriques ayant pour vecteurs des nématodes (Lunden *et al.* 2010; Martelli 2014a; Martelli 2014b).

L'ÉTAT DES VIRUS DANS LES VIGNOBLES DU QUÉBEC ET MANQUEMENTS DES CONNAISSANCES

La dernière enquête qui fait état des virus dans les vignobles du Québec date des années 1990. Cette enquête a permis de révéler la présence du virus de l'enroulement (GLRaV-3) dans 5,12 % des échantillons et d'un des virus impliqués dans la dégénérescence infectieuse (ArMV) dans 2,56 % des échantillons (Mackenzie *et al.* 1996). Cependant, cette enquête n'a ciblé que quatre virus pathogènes de la vigne et les résultats obtenus confirment l'absence des virus GFLV et GLRaV-1. Aucune autre information sur la présence ou l'absence des autres virus de la vigne (pathogènes, bénéfiques ou neutres) n'est actuellement disponible dans la littérature scientifique. Après la détection de GRBaV en Ontario et en Colombie-Britannique, certaines observations en plein champ ont évoqué la présence de symptômes de la tache rouge au Québec, mais aucune confirmation n'a été documentée jusqu'à présent. Il serait donc nécessaire de vérifier la présence des virus de la tache rouge dans les vignobles du Québec, surtout en sachant que l'insecte vecteur, *E. ziczac*, y est présent (Saguez *et al.* 2014). À l'exception de la tache rouge, la plupart des viroses de la vigne sont connues pour causer des pertes de rendement depuis longtemps. Or, nos connaissances de ces maladies sont encore lacunaires, limitées par diverses difficultés, comme l'observation de symptômes contrastants entre les cépages rouges et blancs et des différences génétiques et sérologiques selon les complexes de virus présents (Martelli 2014a; Naidu *et al.* 2014). Dans les années 1990, plusieurs projets fondés sur des principes de biovigilance ont été lancés au Canada afin d'étudier la biodiversité des arthropodes dans les vignobles. Toutefois, les viromes (l'ensemble des virus) des vignobles et les arthropodes qui y sont associés n'ont pas été étudiés, sans doute par manque d'outils moléculaires pour leur détection et identification. L'abondance de virus étant souvent fortement corrélée à l'abondance de microbes (Breitbart et Rohwer 2005), plusieurs virus de la vigne restent possiblement à découvrir. Cette situation est probablement la cause de l'inefficacité des stratégies de lutte contre les viroses qui reposent essentiellement sur des programmes de certification du matériel viticole, ciblant des virus connus et détectables. Ces lacunes nous empêchent aussi de bien comprendre les mécanismes qui sous-tendent la co-infection et les infections virales mixtes. Par exemple, pourquoi une infection causée par différents virus produit-elle des symptômes manifestes chez certains cépages et demeure-t-elle asymptomatique chez d'autres? Quels sont les facteurs qui déterminent les interactions synergétiques et antagonistes au cours d'une co-infection? Quels sont les facteurs qui déclenchent le passage d'interactions bénéfiques à des interactions pathogéniques pour un même virus?

SOLUTIONS ET PERSPECTIVES : RECOURS À LA BIOVIGILANCE

Dans un contexte général, la biovigilance est un système de veille sur des organismes nuisibles réglementés et émergents et de suivi des effets non intentionnels associés à une population donnée d'organismes. Dans le milieu agricole, la biovigilance est une méthode fondée sur le suivi de l'état de l'agroécosystème, à savoir la santé des cultures, afin de

détecter les facteurs de risques, d'en étudier leur développement dans le temps et l'espace en vue de mitiger les menaces potentielles et anticiper l'impact majeur qu'elles peuvent avoir sur le secteur agricole (Carisse *et al.* 2017). Vu qu'elle est basée principalement sur la recherche scientifique, la biovigilance est alors une série d'activités de recherche visant à améliorer notre capacité à répondre rapidement et avec efficacité aux problématiques engendrées par les ravageurs actuels et émergents. Alors, comment la biovigilance peut-elle servir à répondre aux questions posées précédemment et à lutter contre les maladies virales de la vigne ?

En pratique, un programme de biovigilance est composé de six étapes majeures : conscience, détection et identification, évaluation et priorisation, compréhension, atténuation et convenance (Carisse *et al.* 2017). La conscience, dans notre cas, consiste à prendre connaissance de l'ensemble des virus associés à la vigne à l'échelle mondiale et à connaître ceux qui sont présents dans le territoire. Puis, il est aussi important de connaître les virus de la vigne qui sont potentiellement présents ou qui peuvent être introduits vu la présence de leurs vecteurs ou l'échange de matériel végétatif avec un territoire où ils sont présents, comme le cas des virus de la tache rouge. Ceci est possible en se basant sur l'expertise scientifique et technique (observations de symptômes, échanges d'informations, etc.) et les outils de prévision de risques. Toutefois, les informations sur les virus présents dans les vignobles du Québec sont manquantes. Il serait donc nécessaire de mener une enquête régionale, voire nationale, sur l'ensemble des virus présents dans les vignobles. Ceci nous mène directement vers la deuxième étape du programme de biovigilance, la détection et l'identification. Grâce aux récentes avancées dans les techniques omiques, on peut maintenant faire de la recherche sur la diversité virale dans les vignobles (Roossinck 2012, 2014; Stobbe et Roossinck 2014). Les nouvelles techniques de séquençage à haut débit (NGS) (Al Rwahnih *et al.* 2015) et les techniques d'amplification de type « Rolling circle » (RCA) (Inoue-Nagata *et al.* 2004) ont rendu possibles la détection, l'identification et la prospection efficaces de virus connus ou nouveaux, associés à la vigne. De telles études pourraient dévoiler une longue liste de virus jusqu'ici inconnus du milieu viticole et leur classification en virus bénéfiques, pathogènes et neutres. Cette classification fera partie des deux prochaines étapes du programme de biovigilance, l'évaluation et la priorisation, et la compréhension, qui sont généralement traitées en parallèle. Une fois que l'ensemble des virus associés à la vigne seront caractérisés, l'évaluation consiste à identifier en priorité les virus qui sont déjà identifiés comme agents pathogènes et ayant un impact économique majeur sur la viticulture. La distribution temporelle et spatiale de ces virus doit être étudiée afin d'évaluer les risques de leur propagation et d'épidémiologie en relation avec la présence des vecteurs, l'échange de matériel de propagation et les conditions climatiques qui font que ces virus peuvent constituer une menace. De plus, la connaissance de la diversité virale pourrait aussi mener à la découverte de relations bénéfiques ou négatives entre la vigne et les virus. Même si la plupart des interactions vigne-virus bien étudiées sont associées à des maladies, certaines études récentes ont démontré des interactions positives (Perrone *et al.* 2017; Stobbe et Roossinck 2014). Par exemple, on a observé que les vignes infectées par certaines souches de virus GLRaV se montraient plus résistantes à *Plasmopara viticola*, l'agent causal du mildiou de la vigne (Repetto *et al.* 2012). En outre, chez la vigne, les infections virales mixtes et la co-infection sont communes dans des conditions de terrain et elles compliquent les diagnostics et l'élaboration de stratégies de lutte efficaces (Jo *et al.* 2015; Lunden *et al.* 2010). Credi (1997) a démontré

que des infections virales mixtes augmentent la gravité de la maladie et intensifient les symptômes. Afin de comprendre ces interactions, il est important de mener des essais de pathogénicité et de co-infection *in vitro* et *in vivo* en vue de pouvoir catégoriser les nouveaux virus comme pathogènes directs et indirects, bénéfiques ou neutres. Par la suite, le succès du programme de biovigilance ne sera concret qu'avec des stratégies d'atténuation efficaces. Cette étape consiste essentiellement à la prise de décisions à partir des données obtenues des étapes précédentes et à agir en conséquence. La liste « prioritaire » des virus pathogènes qui ont été détectés et identifiés servira par exemple à établir des programmes de certification de plants exempts de ces virus, éliminer les vignes infectées et contourner les vignobles infectés par des zones tampons pour éviter la propagation de ces virus dans d'autres territoires. Les virus pathogènes, connus pour avoir un impact économique majeur ailleurs et qui n'ont pas été détectés, vont alors être ciblés par les services de quarantaine lors de l'importation de plants de vigne. Ensuite, il serait aussi possible d'utiliser les virus qui ont été évalués bénéfiques pour des moyens de lutte préventive ou curative. Enfin, comme pour tout autre programme, un suivi est nécessaire afin de vérifier si les décisions et les actions qui ont été prises sont assez efficaces pour réussir l'ensemble du programme de biovigilance (la convenance) (Fig. 1).

CONCLUSION : LA BIOVIGILANCE POUR LE CONTRÔLE DES VIRUS DANS LA VIGNE

Il n'existe pas de cure connue contre les viroses de la vigne, et les moyens de lutte chimiques sont coûteux et risquent de ne pas être efficaces en plus de susciter des préoccupations environnementales. Seulement environ la moitié des virus identifiés constituent une menace économique majeure pour les vignobles (Martelli 2014a). Nombre de ces virus sont asymptomatiques et difficiles à identifier et ils peuvent entretenir des relations mutualistes avec leurs hôtes (Perrone *et al.* 2017). Il devient évident que nous devons repenser la protection sanitaire des vignobles et faire de la sensibilisation sur les interactions vigne-virus. Il nous faut passer d'une perspective de pathosystème (relation binaire de type vigne-virus ou vigne-complexe viral) à une perspective de « virosystème » et étudier la vigne et son virome comme des éléments qui forment un microécosystème. Nous devons, à cette fin, améliorer notre compréhension de l'épidémiologie du virome de la vigne. Il faudrait orienter la recherche sur l'anticipation de menaces potentielles et non sur des interventions typiquement réactives aux dommages constatés. En fait, sur le plan strictement épidémiologique, l'efficacité des stratégies d'atténuation diminue à mesure que l'infection virale progresse. Par souci d'efficacité, les stratégies de lutte devraient être réservées aux cas où la probabilité de contrôler la maladie est élevée. Ainsi, une partie des ressources pour la recherche devraient être affectées à des activités qui visent à élaborer des stratégies d'atténuation en amont. Un programme de recherche en biovigilance ne devrait pas se limiter à élaborer des stratégies d'atténuation (de menaces actuelles et potentielles), mais devrait aussi étudier leurs impacts à l'échelle de l'écosystème. Aussi, grâce aux techniques omiques, nous pouvons désormais entrevoir la gestion d'un vignoble comme un macrobiome, c'est-à-dire une communauté écologique plus large, constituée de divers types de microorganismes et de macroorganismes qui modulent la réponse des vignes aux facteurs biotiques et abiotiques.

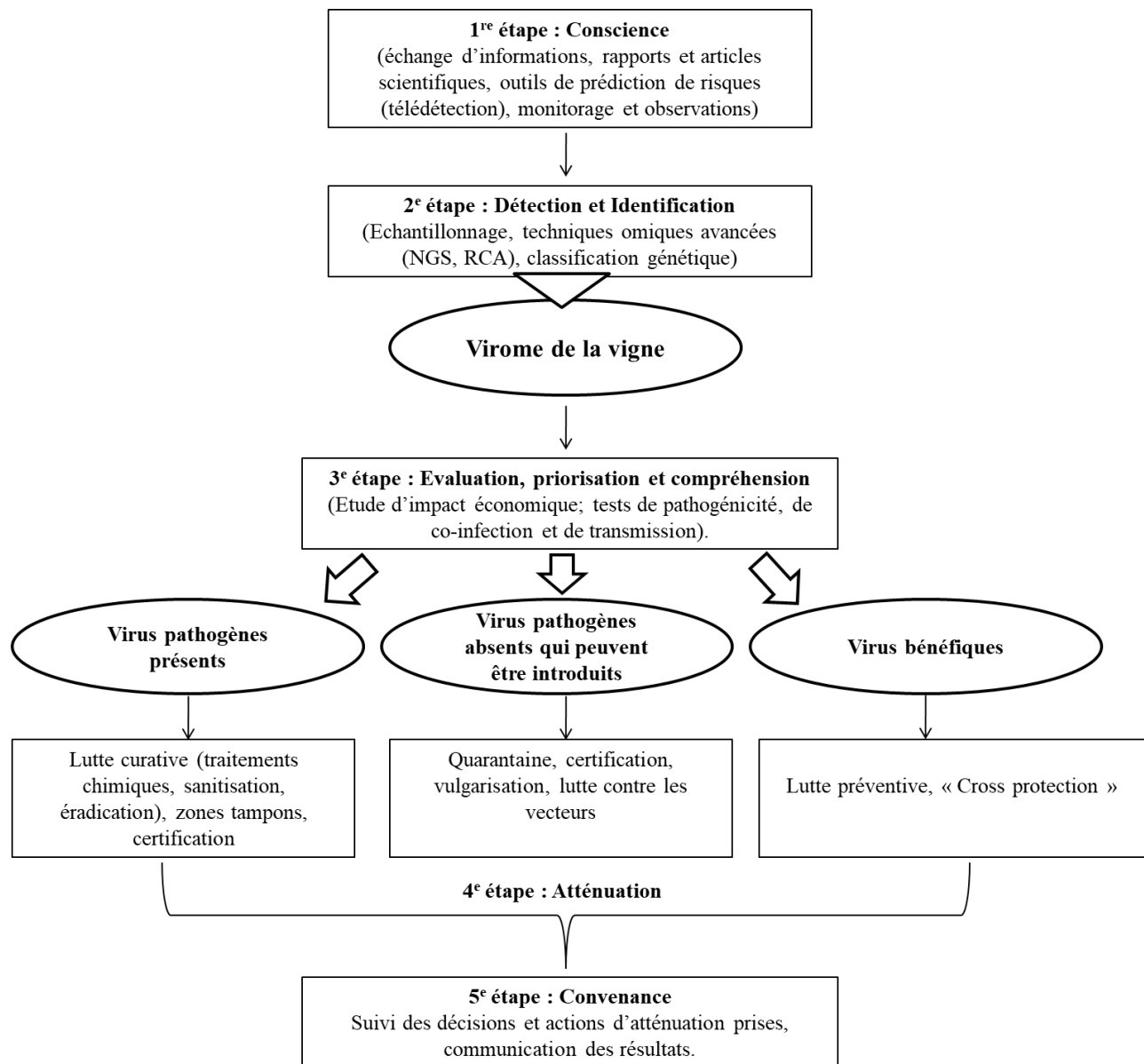


Figure 1. Plan d'un programme de biovigilance pour lutter contre les maladies virales de la vigne

REFERENCES

- Adiputra, J., S.R. Kesoju et R.A. Naidu. 2018.** The relative occurrence of grapevine leafroll-associated virus 3 and grapevine red blotch virus in Washington State vineyards. *Plant Dis.* 102 : 2129-2135. doi:10.1094/PDIS-12-17-1962-RE
- Al Rwahnih, M., S. Daubert, D. Golino, C. Islas et A. Rowhani. 2015.** Comparison of next-generation sequencing versus biological indexing for the optimal detection of viral pathogens in grapevine. *Phytopathology* 105 : 758-763.
- Al Rwahnih, M., A. Dave, M. Anderson, A. Rowhani, J.K. Uyemoto et M.R. Sudarshana. 2013.** Association of a DNA virus with grapevines affected by red blotch disease in California. *Phytopathology* 103 : 1069-1076.

- Atallah, S., M. Gomez, M. Fuchs et T. Martinson. 2012.** Economic impact of grapevine leafroll disease on *Vitis vinifera* cv. Cabernet franc in Finger Lakes vineyards of New York. *Am. J. Enol. Vitic.* 63 : 73-79.
- Bertsch, C., M. Beuve, V.V. Dolja, M. Wirth, F. Pelsey, E. Herbbach et O. Lemaire. 2009.** Retention of the virus-derived sequences in the nuclear genome of grapevine as a potential pathway to virus resistance. *Biology Direct* 4 : 21.
- Breitbart, M. et F. Rohwer. 2005.** Here a virus, there a virus, everywhere the same virus? *Trends Microbiol.* 13 : 278-284.
- Carisse, O., M.L. Fall et C. Vincent. 2017.** Using a biovigilance approach for pest and disease management in Quebec vineyards. *Can. J. Plant Pathol.* 39 : 393-404.
- Credi, R. 1997.** Characterization of grapevine rugose wood disease sources from Italy. *Plant Dis.* 81 : 1288-1292.

- Hewitt, W.B. 1968.** Viruses and virus diseases of the grapevine. *Rev. Appl. Mycol.* 47 : 433-455.
- Inoue-Nagata, A.K., L.C. Albuquerque, W.B. Rocha et T. Nagata. 2004.** A simple method for cloning the complete begomovirus genome using the bacteriophage phi29 DNA polymerase. *J. Virol. Methods* 116 : 209-211.
- International Organisation of Vine and Wine. 2018.** IOV statistical report on world viticulture. 2018 world viticulture situation. [En ligne] <http://www.oiv.int/public/medias/6371/oiv-statistical-report-on-world-viticulture-2018.pdf>
- Jo, Y., H. Choi, J.K. Cho, J.Y. Yoon, S.K. Choi et W.K. Cho. 2015.** In silico approach to reveal viral populations in grapevine cultivar Tannat using transcriptome data. *Sci. Rep.* 5 : 15841.
- Krenz, B., J.R. Thompson, H.L. McLane, M. Fuchs et K.L. Perry. 2014.** Grapevine red blotch-associated virus is widespread in the United States. *Phytopathology* 104 : 1232-1240.
- Luhn, C.F. et A.C. Goheen. 1970.** Viruses in early California grapevines. *Plant Dis. Rep.* 54 : 1055-1056.
- Lunden, S., B. Meng, J. Avery et W. Qiu. 2010.** Association of grapevine fanleaf virus, Tomato ringspot virus and grapevine rupestris stem pitting-associated virus with a grapevine vein-clearing complex on var. Chardonnay. *Eur. J. Plant Pathol.* 126 : 135-144.
- MacKenzie, D.J., R.C. Johnson et C. Warner. 1996.** Incidence of four important viral pathogens in Canadian vineyards. *Plant Dis.* 80 : 955-958.
- Maree, H.J., R.P. Almeida, R. Bester, K.M. Chooi, D. Cohen, V.V. Dolja et J.T. Burger. 2013.** Grapevine leafroll-associated virus 3. *Front Microbiol.* 4 : 2-21.
- Martelli, G.P. 2014a.** Directory of virus and virus-like diseases of the grapevine and their agents. *J. Plant Pathol.* 96 : 1-136.
- Martelli, G.P. 2014b.** Grapevine infecting viruses. *J. Plant Pathol.* 96 : 7-8.
- Martelli, G.P. 2017.** An overview grapevines viruses, viroids and the diseases they cause. Pages 31-46 dans B. Meng, G.P. Martelli, D.A. Golino et M. Fuchs (dir.). *Grapevines Viruses: Molecular Biology, Diagnostics and Management.* Springer International Publishing.
- Martelli G.P. et E. Boudon-Padieu. 2006.** Directory of infectious diseases of grapevines and viruses and viruslike diseases of the grapevine: bibliographic report of 1998-2004. CIHEAM, Bari, Italie.
- Martin, R.R., K.C. Eastwell, A. Wagner, S. Lamprecht et I.E. Tzanetakis. 2005.** Survey for viruses of grapevine in Oregon and Washington. *Plant Dis.* 89 : 763-766.
- McFadden-Smith, W., L. Stobbs, K. Hoshkiw et N. Grieg. 2014.** Grapevine virus survey, 2013. Grape Virus Workshop 2014. [En ligne] <http://www.grapegrowersofontario.com/education>
- Naidu, R.A., S. O'Neil et D. Walsh. 2008.** Grapevine leafroll disease. WSU Extension Bulletin EB2027E. [En ligne] <http://cru.cahe.wsu.edu/CEPublications/eb2027e/eb2027e.pdf>
- Naidu, R.A., A. Rowhani, M. Fuchs, D. Golino and G.P. Martelli. 2014.** Grapevine leafroll: a complex viral disease affecting a high-value fruit crop. *Plant Dis.* 98 : 1172-1185.
- Pacottet, B. 1906.** Coloration anormale des feuilles de vigne [Anomalous colouration of vine leaves]. *Rev. Vitic.* 26 : 466-488.
- Perrone, I., W. Chitarra, P. Boccacci et G. Gambino. 2017.** Grapevine-virus-environment interactions: an intriguing puzzle to solve. *New Phytol.* 213 : 983-987.
- Poojari, S., O.J. Alabi, V.Y. Fofanov et R.A. Naidu. 2013.** A leafhopper transmissible DNA virus with novel evolutionary lineage in the family Geminiviridae implicated in grapevine redleaf disease by next generation sequencing. *PLoS One* 11 : e0147510.
- Poojari, S., D.T. Lowery, M. Rott, A.M. Schmidt et J.R. Urbez-Torrez. 2017.** Incidence, distribution and genetic diversity of grapevine red blotch virus in British Columbia. *Can. J. Plant Pathol.* 39 : 201-211.
- Ravaz, L. et L. Roos. 1905.** Le rougeau de la vigne [Grapevine leafroll]. *Progrès Agric. Vitic.* 22 : 39-40.
- Repetto, O., N. Bertazzon, M. De Rosso, L. Miotti, R. Flamini, E. Angelini et M. Borgo. 2012.** Low susceptibility of grapevine infected by GLRaV-3 to late *Plasmopara viticola* infections: towards understanding the phenomenon. *Physiol. Mol. Plant P.* 79 : 55-63.
- Reynolds, A.G. 2017.** The grapevine, viticulture, and winemaking: a brief introduction. Pages 3-29 dans B. Meng, G.P. Martelli, D.A. Golino et M. Fuchs (dir.). *Grapevines Viruses: Molecular Biology, Diagnostics and Management.* Springer International Publishing.
- Ricketts K.D., I.G. Miguel, M.F. Fuchs, T.E. Martinson, R.J. Smith, M.L. Cooper, M.M. Moyer et A. Wise. 2017.** Mitigating the economic impact of grapevine red blotch: optimizing disease management strategies in U.S. vineyards. *Am. J. Enol Viticult.* 68 : 127-135.
- Roossinck, M.J. 2012.** Plant virus metagenomics: biodiversity and ecology. *Annu. Rev. Genet.* 46 : 357-367.
- Roossinck, M.J. 2014.** Metagenomics of plant and fungal viruses reveals an abundance of persistent lifestyles. *Front. Microbiol.* 5 : 767.
- Saguez, J., C. Olivier, A. Hamilton, T. Lowery, L. Stobbs, J. Lasnier, B. Galka, X. Chen, Y. Mauffette et C. Vincent. 2014.** Diversity and abundance of leafhoppers (Hemiptera: Cicadellidae) in Canadian vineyards. *J. Insect Sci.* 14. doi:10.1093/jis/14.1.73.
- Stobbe, A.H. et M.J. Roossinck. 2014.** Plant virus metagenomics: what we know and why we need to know more. *Front. Plant Sci.* 5 : 150.
- Sudarshana, M.R., K.L. Perry et M.F. Fuchs. 2015.** Grapevine red blotch associated virus, an emerging threat to the grapevine industry. *Phytopathology* 105 : 1026-1032.
- Wallingford, A.K., M.F. Fuchs, T. Martinson, S. Hesler et G.M. Loeb. 2015.** Slowing the spread of grapevine leafroll-associated viruses in commercial vineyards with insecticide control of the vector, *Pseudococcus maritimus* (Hemiptera: Pseudococcidae). *J. Insect Sci.* 15 : 112.
- Yepes, L.M., E. Gieniewicz, B. Krenz, H. McLane, J.R. Thompson, K.L. Perry et M. Fuchs. 2018.** Causative role of grapevine red blotch virus in red blotch disease. *Phytopathology* 108 : 902-909.