



ANALYSE COMPARATIVE DE CINQ DISPOSITIFS DE PROTECTION HIVERNALE DANS LA VIGNE SEMI-RUSTIQUE

Fabien Gagné

Rapport présenté à

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

28 février 2013

Fiche synthèse du projet

Analyse comparative de cinq dispositifs de protection hivernale dans la vigne semi-rustique

Auteur : Fabien Gagné, viticulteur à Vignobles Saint-Rémi

Durée du projet : Novembre 2011 à février 2013

Résumé : Au cours de l'hiver 2011-2012, cinq types de toiles de protection hivernale furent mises à l'essai de par leur propriété potentielle à protéger des dommages hivernaux une vigne semi-rustique de cépage Maréchal Foch en Montérégie-Ouest (Québec, Canada). Les traitements comparés furent Hibertex Pro (Soleno), Hibertex Pro plastifié et microperforé (Soleno), Hibertex Pro (Soleno) recouvert d'un AirGuard® (DuPont™ de Nemours), Hibertex Pro (Soleno) recouvert d'un Air-Lock™ (Matériaux de construction BP Canada), ainsi que Arbopro™ (Texel®). Tous les systèmes ont permis de protéger adéquatement la vigne de la température minimale extérieure de -25,3 °C atteinte le 16 janvier 2012. Les taux de survie des bourgeons primaires furent bons et équivalents pour tous les traitements. Les systèmes ont nettement diminué le nombre d'heures d'exposition au froid le plus intense. Les systèmes muni d'un pare-air ont légèrement mieux réussi à cet égard. La neige fournit un facteur d'isolation important et semble aussi améliorer l'étanchéité des systèmes. Une installation soignée est vraisemblablement plus importante que le choix des matériaux en lui-même. L'accumulation de neige sur les systèmes, même partielle, confère quelques degrés de protection, mais reste préoccupante si les conditions sont à la fois venteuses et que la température s'approche de la température de cryodommage du cépage. L'analyse climatologique indique qu'il est très probable que des conditions froides surviennent, pour le site étudié, alors que le couvert nival ne favorise pas une protection avantageuse par les géotextiles. Cette étude n'a pas permis de déterminer si un système conçu d'un géotextile plus un pare-air est supérieur à un système muni d'un géotextile seul, ni d'ailleurs si un type de pare-air est supérieur à un autre. Considérant les coûts plus élevés des systèmes munis d'un pare-air, la valeur économique de ceux-ci n'est pas démontrée. Des doutes subsistent quant à la durabilité à long terme des systèmes de protection par géotextile, du moins pour les sites où surviennent des redoux occasionnels, et d'autres travaux sont requis avant de pouvoir en faire la recommandation. D'autre part, les systèmes se sont montrés capables de rester sur la vigne après le débourrement sans causer de dommages apparents de surchauffe. D'autres travaux seraient requis pour vérifier si cette technique peut provoquer de la coulure et principalement d'en vérifier la faculté à protéger de dommages causés par le gel printanier. Des travaux sur l'amélioration de la robustesse des installations et sur la qualité de l'étanchéité seraient également souhaitables.

Mots clés : vigne, protection hivernale, géotextile, toile isolante, couvert nival, neige, hiver, pare-air, Marechal Foch, Québec, Canada

Abstract : (French) During the 2011-2012 winter, five types of insulating tarps were evaluated for their potential properties to protect from winter frost damage the semi-hardy grapevine variety Marechal Foch in the Montérégie region (Quebec, Canada). The treatments were Hibertex Pro (Solen), Hibertex Pro laminated with a microperforated polyéthylène (Solen), Hibertex Pro (Solen) covered with AirGuard® (DuPont™ de Nemours), Hibertex Pro (Solen) covered with Air-Lock™ (BP Building products of Canada), and Arbopro™ (Texel®). All systems provided adequate protection of the grapevines from the -25,3 °C minimum reached on January 16th 2012. The primary bud survival rate were satisfactory and shown no significant difference among systems. The systems clearly lowered the number of hours exposed to the lowest temperatures. Systems equipped with a weather-barrier slightly outperformed the other on this aspect. Snow provided an important insulating factor and seems to also improve the airtightness of the systems. Careful installation of the systems is likely more important than the selection of material. The accumulation of snow on the systems, even partially, provides a few degrees of protection, but lack of a quality snow cover is of concern in windy condition while temperatures approaches the variety's maximum hardiness temperature. The climatological study reveals that it is very probable to have an intense cold occurrence, for the studied site, while the snow cover is unfavourable for cold protection by the geotextiles. We were not able to establish if a system made of a geotextile and a weather-barrier is superior to a system made of a geotextile alone, neither if a weather-barrier material is superior to another. Considering the increased costs of systems with a weather-barrier, their economic value is not demonstrated. Doubts remain on the long term sustainability of winter cold protection using geotextiles, at least for sites where the snow cover occasionally melt throughout winter, and more research would have to be done before these systems could be recommended. On the other hand, systems where shown capable on staying on the vines long after bud burst without causing any apparent overheat damage. More work would be needed to assess whether this technique could cause *coulure* (shatter) and mainly to verify its ability to protect against spring frost damages. Work on improving the installation robustness and air-tightness would be desirable.

Keywords : grapevine, winter protection, geotextile, insulating tarp, snow cover, weather barrier, Marechal Foch, Quebec, Canada

Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce à la participation financière du Ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation du Québec dans le cadre du programme Appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région – volet 5, ainsi que la participation de Dubois Agrinovation.



Nous souhaitons également remercier Dura-club et particulièrement Raphaël Fonclara et Marie-Claude de Passillé pour l'aide technique à la prise de certaines données, ainsi que les personnes suivantes qui ont participé à la révision du manuscrit :

Yvon Jolivet, pr. de recherche, Climatologie et microclimatologie appliquée, U. Québec à Rimouski

Karine Bergeron, agr., Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'agroalimentaire du Québec

Table des matières

Remerciements.....	4
1 Introduction.....	6
2 Matériel et méthodes.....	7
3 Résultats.....	12
3.1 Caractéristiques des hivers.....	12
3.2 Températures de l'air hors et sous les systèmes.....	13
3.3 Survie des bourgeons primaires.....	16
3.4 Température du sol.....	18
3.5 Échaudage.....	19
3.6 Longueur des sarments débouffés.....	20
3.7 Analyse climatologique.....	21
3.8 Coûts des systèmes.....	22
4 Discussion.....	24
5 Conclusion.....	27
6 Point de contact pour informations supplémentaires.....	28
7 Références.....	29
Appendice 1 : Schéma du dispositif expérimental de 2011-2012.....	31

1 Introduction

L'une des plus grandes contraintes à laquelle fait face le viticulteur québécois est la survie des bourgeons à l'hiver ainsi que la pérennité de la vigne qui en est conséquente. Même le sud du Québec, là où sont installés la majorité des vignobles, peut subir des températures inférieures à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Selon l'Atlas agroclimatique du Québec (2012), des températures inférieures à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ peuvent survenir deux années sur dix. Malgré la venue de cépages plus tolérants à l'hiver, la protection hivernale est encore une préoccupation importante, notamment à cause de l'existence d'une base déployée importante de cépages peu tolérants au froid, et d'autre part par le regain d'intérêt à cultiver des cépages encore moins tolérants mais dont les qualités de production et de transformation sont d'un grand intérêt. En ce sens, la recherche de moyens alternatifs de protection hivernale est toujours à propos. L'évaluation de la résistance des plants *in situ* dans des conditions réelles de fluctuation de température, de vent (Plocher et Parke, 2001) et de couvert nival est d'une importance certaine.

Fin des années 90 et début 2000, de nombreux travaux ont étudié l'utilisation de neige naturelle, neige artificielle, terre, feuilles, géotextiles, pare-air, isolants et même de systèmes chauffant pour protéger les cépages à rusticité limitée (Jolivet et coll., 1998a; Jolivet et coll., 1998b; Telebak, 2000; Jolivet et Dubois, 2000a, Jolivet et Dubois, 2000b, Carrière, 2001; Telebak et coll. 2002; Khanizadeh et coll., 2002; Aloir-Roy, 2003; Aloir-Roy et coll, 2004; Jolivet et Dubois 2006).

Par ailleurs, les redoux hivernaux plus fréquents, causant la diminution ou la disparition du couvert nival, peuvent rendre inefficaces les stratégies de protection (Jolivet, 2007; Jones, 2012). Les changements climatiques et plus particulièrement les changements régionaux à l'échelle du sud du Québec dans le passé récent (Tate, 2001; Jones, 2007; Jones, 2012) nous laissent entrevoir que les méthodes de protections hivernales les moins invasives peuvent être (ré-)évaluées, dix ans après ces derniers essais.

L'objectif de ce projet est de vérifier si des géotextiles utilisés seuls ou en association avec des pare-air sont aptes à protéger adéquatement les vignes semi-rustiques Maréchal Foch dans les conditions qui prévalent dans le sud du Québec.

Ce rapport porte principalement sur les activités liées à l'expérimentation 2011-2012, mais relate également, au bénéfice du lecteur, certaines des activités faites durant les deux hivers précédant.

2 Matériel et méthodes

Au cours de l'hiver 2011-2012, cinq combinaisons de toiles de protection hivernale furent mises à l'essai : Hibertex Pro (Soleno), Hibertex Pro plastifié et microperforé (Soleno), Hibertex Pro (Soleno) recouvert d'un AirGuard® (DuPont™ de Nemours), Hibertex Pro (Soleno) recouvert d'un Air-Lock™ (Matériaux de construction BP Canada), ainsi que Arbopro™ (Texel®).¹

Montrés à l'illustration 1, les géotextiles ou combinaisons de pare-air et géotextiles sont disposés sur une vigne de cépage semi-rustique Maréchal Foch de 16 ans d'âge à Riverfield, Québec, Canada (45° 09' 16.00" N - 73° 48' 36.00" W). Les traitements sont présentés au tableau 1 et le schéma illustré à l'appendice 1. Chaque unité expérimentale consiste en une longueur de 7,50 mètres linéaires sur un rang de vigne, composée de 7 ou 8 ceps. Le plan expérimental consiste en un bloc complet aléatoire de 5 traitements x 4 répétitions, totalisant 20 unités expérimentales de 7,5 mètres chacune, disposées sur 5 rangs de vigne, soit environ 150 ceps. Des unités de garde sur tous les côtés du dispositif ont reçu le traitement « Hibertex Pro seul ».

Tableau 1: Traitements comparés en 2011-2012

Traitement	Description
H	Hibertex Pro seul
H+P	Hibertex Pro recouvert d'un film de polyéthylène de 4 millièmes de pouces microperforé et laminés ensemble par le manufacturier (illustration 3)
H+AL	Hibertex Pro recouvert d'un pare-air Air-Lock™
H+AG	Hibertex Pro recouvert d'un pare-air AirGuard® (illustration 4)
AR	Arbo-Pro seul

Le Hibertex Pro est un géotextile de 2,2 mm à 2,6 mm d'épaisseur fait de fibres de polyester résistant aux rayons U.V. offrant une valeur isolante R d'environ 0,04, estimé à partir des données du manufacturier. Le Arbo-Pro™ est un géotextile de 1,7 à 2,3 mm d'épaisseur fait de fibres de polyester résistant aux rayons U.V. offrant une valeur isolante R d'environ 0,03. Le Air-Lock est une membrane pare-air de polypropylène non tissé enduit d'un côté d'une émulsion perméable à la vapeur d'eau et contient des agents de protection contre les ultraviolets. AirGuard® est une membrane pare-air de polypropylène tissé et traité contre les ultraviolets. Tous les matériaux sélectionnés sont de couleur blanche, donc réfléchissantes au rayonnement solaire, afin d'éviter la surchauffe durant les journées ensoleillées du printemps.

Les vignes furent taillées à l'automne 2011 en préservant parfois trois ou quatre longues baguettes courbées et plantées dans le sol pour qu'elles maintiennent un bas profil, parfois en taille Chablis lorsque le cep ne se prêtait pas à la taille en longues baguettes. Elles furent ensuite couvertes des dispositifs de protection le 4 décembre 2011 et découvertes seulement le 20 mai 2012 lorsque tous les risques de gel printaniers furent passés.

¹Texel® est une marque déposée de ADS inc. (Saint-Élzéar-de-Beauce, QC CANADA)

AirGuard® est une marque déposée de E.I. DuPont de Nemours S.A.R.L.

Air-Lock™ est une marque de commerce de Matériaux de construction BP Canada inc.

Les géotextiles et les pare-airs étaient posés sur les vignes et le premier fil releveur. Ils étaient retenus au sol par des agrafes d'acier de 18 cm de long enfoncés au travers l'empilement. Les poteaux étaient contournés par enveloppement.

Pour l'une des répétitions de chaque traitement, une sonde de température (HOBO Pro V2 U23-001, Onset Computer Corp. MA USA) était installée sous les géotextiles de chacun des traitements et attachée à un sarment de vigne (illustration 2). De plus, une sonde mesurant la température extérieure à 1,0 mètre du sol (HOBO Pro Series RH Temp, Onset Computer Corp. MA É.-U.) était logée dans un écran antirayonnement (Onset Computer Corp. modèle RS1). La fréquence d'acquisition de la température était fixée à 15 minutes et mesurée du 21 décembre 2011 au 25 mai 2012. Les sondes ayant une précision de $\pm 0,5$ °C jusqu'à -30 °C, furent synchronisés pour prendre leurs lectures au même instant à ± 10 secondes.



Illustration 1: Dispositif expérimental au 26 mars 2012.



Illustration 2: Disposition des enregistreurs de température fixés à un sarment à environ 25 cm du sol, sous les protections.



Illustration 3: Hibertex Pro laminé d'un polyéthylène microperforé.



Illustration 4: Hibertex Pro recouvert d'un AirGuard.

Une évaluation de la survie des bourgeons à l'hiver a été effectuée le 25 mai 2012, soit cinq jours après avoir retiré les protections. Les trois ceps au centre de chaque unité expérimentale furent examinés. Cette méthode fut choisie pour garantir l'objectivité dans l'échantillonnage, car le nombre de plants par unité expérimentale était trop grand pour tous les examiner économiquement. Les sarments débourrés issus des yeux francs laissés à la taille furent comptés et mesurés en centimètres. Les bourgeons poussant à la base des sarments (bourillons) furent donc exclus. Une valeur de 0 cm a été attribuée aux bourgeons non débourrés. Certains sarments ont pu être qualifiés issus de bourgeons secondaires par jugement d'expert et consignés comme 0 cm.

En deux occasions au printemps, soit les après-midis du 23 mars (temps nuageux) et du 19 avril 2012 (temps ensoleillé), la température de surface du sol sous les protections fut mesurée au thermomètre infrarouge (Nexxtech modèle 6310887, La Source Bell Électronique inc.) et comparée à celle au centre de l'allée. Au centre de chaque unité expérimentale, sous les dispositifs, la moyenne de trois températures mesurées en trois points distants d'environ 30 cm fut ainsi comparée à celle de la moyenne en trois points à côté des dispositifs.

2010-2011

À l'hiver 2010-2011, aucun dispositif de protection n'a pu être installé, car une chute de neige de 35 cm a surpris l'expérimentateur avant qu'il puisse y installer les dispositifs. En substitution, la neige accumulée au sol dans les allées (illustration 5) a été butée sur les plants à chaque précipitation notable durant cet hiver (illustrations 6). Aucune donnée n'a été prélevée. La vigne avait toutefois été préalablement taillée et préparée à l'automne de la même façon que les deux autres années.



Illustration 5: Avant buttage de la neige, 16 janvier 2011.



Illustration 6: Après buttage de la neige, 16 janvier 2011.

2009-2010

Au cours de l'hiver 2009-2010, six combinaisons de toiles de protection hivernale furent mises à l'essai, dont certaines novatrices : Hibertex Pro (Solen), Hibertex Pro (Solen) recouvert d'un Microfab (Soprema), Hibertex Pro (Solen) recouvert d'un AirGuard® (DuPont™ de Nemours), Hibertex Pro (Solen) recouvert d'un Air-Lock™ (Matériaux de construction BP Canada), Plastique réfléchissant (aluminisé vers le dessous) recouvert d'un Hibertex Pro (Solen), Plastique réfléchissant (aluminisé vers le dessous) recouvert d'un Hibertex Pro (Solen) et recouvert d'un AirGuard® (DuPont™ de Nemours), et polyéthylène transparent recouvert d'un Hibertex Pro (Solen). Le dispositif de 2009-2010 comportait trois à quatre répétitions par traitement, mais disposées d'une façon qui ne permet pas le traitement statistique.

Données climatiques

Les données utilisées pour les analyses climatiques proviennent des Archives nationales d'information et de données climatologiques d'Environnement Canada (2013).

Les données utilisées sont celles de la station de Sainte-Martine (Québec, Canada) située à 8 km du site d'essai. Lorsqu'une donnée de température minimale journalière était manquante, elle a été complétée avec celle de la station de Sainte-Clotilde (Québec, Canada) située à 10 km du site d'essai, ou celle d'Hemmingford-Four-Winds (21 km) si aussi manquante. Lorsque la donnée journalière de quantité de neige au sol était manquante à la station de Sainte-Martine, la donnée était interpolée à la moindre valeur du jour précédent ou suivant.

Analyses statistiques

Le traitement statistique des résultats a été effectué sur le logiciel libre IBM SPSS Statistics V21 . Un test d'homogénéité de la variance a été effectué préalablement, puis les moyennes et écarts types ont été traités par une analyse de la variance ANOVA à un seuil de signification $p < 0,05$, suivi d'une classification par le test de Waller-Duncan.

3 Résultats

3.1 Caractéristiques des hivers

Hiver 2010-2011

Une première chute de neige importante est tombée dans la première semaine de décembre 2009. Bien que le couvert nival soit fondu à quelques reprises, trois chutes de neige importantes ont précédé chaque période de froid intense, ce qui a permis de butter la vigne sur la vigne à chaque occasion.

Hiver 2011-2012

La mi-décembre a été marquée par des conditions venteuses de 50 à 70 km/h avant que la neige ne s'installe, ce qui a délogé les modalités munies de pare-air. Les dispositifs de retenue (agrafes) se sont avérés insuffisants pour les modalités où le pare-air n'était pas cousu au géo-textile. L'ajout d'une pierre par mètre à ces traitements a permis de les solidifier pour le reste de l'hiver. Une première chute de neige le 24 décembre 2011 de près de 10 cm est venue couvrir quelque peu les systèmes juste avant l'arrivée du premier froid intense de -18 °C survenu le 29 décembre 2011.

Le 4 janvier le couvert nival fond puis une nouvelle chute de neige plus importante arrive juste avant la période la plus froide de l'hiver (-25,3 °C) du 14 au 22 janvier 2012, le seul moment de l'hiver où la survie des bourgeons de Maréchal Foch a vraiment été menacée (encadré sur l'illustration 7). Ce fut la seule semaine où les dispositifs furent entièrement couverts de neige. Un redoux accompagné de pluie vient découvrir le tiers supérieur des dispositifs la semaine suivante. En somme, ce fut un hiver avec une succession de précipitations neigeuses précédant les épisodes les plus froids.

Printemps 2012

Plusieurs jours avec des températures maximales légèrement supérieures à 20 °C et minimales supérieures à 10 °C à la fin mars 2012 ont fait de ce millésime un printemps particulièrement hâtif pour l'ensemble des cultures pérennes.

En avril, sans couverture nivale, tous les systèmes ont de la difficulté à rester en place dû aux conditions venteuses fréquentes. Nous constatons que la performance des agrafes s'avère insuffisante dans ces conditions.

Le 18 avril 2012 les températures passent vers -3 °C dans la nuit alors que la vigne est au stade E.L. 5/BBCH 07 et quelques bourgeons près du stade pointe verte. Des bourgeonnements spontanés situés sur les troncs (pampres) sont au stade E.L. 5/BBCH 9. Plusieurs nuits de mai ont été propices au gel printanier.

Température extérieure du 21 décembre 2011 au 28 mai 2012

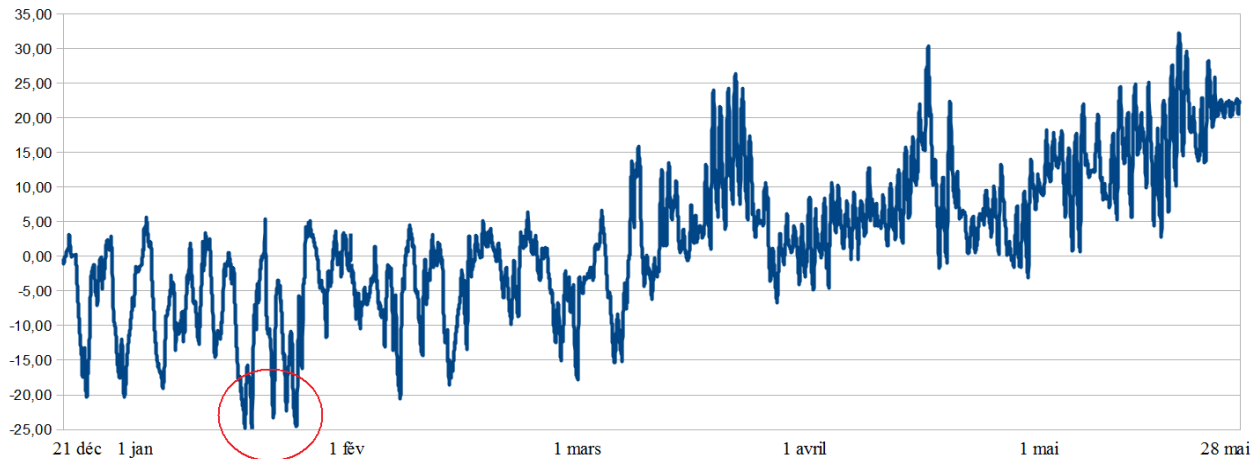


Illustration 7: Température extérieure pendant l'hiver 2011-2012.

3.2 Températures de l'air hors et sous les systèmes

Des thermomètres étaient installés sous une seule des répétitions pour chacun des traitements et ont fourni des données du 21 décembre 2011 au 20 mai 2012, sauf pour celui sous le Hibertext Pro qui a été incorrectement programmé et n'a pris des mesures que sur quelques heures. Pour cette raison, les données de température pour le traitement Hibertext Pro ne peuvent être présentées. Il faut user de réserve dans l'interprétation de ces données puisqu'elles ne représentent qu'une seule répétition.

À l'extérieur, la température minimale enregistrée a été de $-25,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit très proche de $-26,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ la température de rusticité connue du Maréchal Foch à mi-hiver (Quamme, 1986). Les températures minimales atteintes sous les systèmes s'échelonnaient entre $-10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Hibertext Pro + Air-Lock) à $-17,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Arbo-Pro) – voir tableau 2. Ainsi, tous les systèmes ont permis le maintien d'une température largement plus élevée que le seuil de tolérance au froid du cépage. À l'observation du nombre d'heures d'exposition au froid par seuils de température (tableau 3), tous les systèmes ont permis de diminuer le nombre d'heures d'exposition aux plus froides températures. Les systèmes munis d'un pare-air semblent avoir légèrement surpassé les autres et le système Hibertext Pro + AirGuard a montré les meilleures performances.

Toutefois, l'essentiel de cette protection semble être offert par le couvert nival. Par exemple, le 29 décembre 2011 (illustration 8) alors qu'un couvert nival couvre partiellement les traitements Arbopro et Hibertext Pro plastifié, on constate des variations de température pendant les heures d'ensoleillement, alors que le 15-16 janvier 2013 avec un couvert nival complet (illustration 9), les températures sous les systèmes sont d'une quinzaine de degrés supérieurs à la température extérieure et varient peu pendant le jour.

Résultats

	Température extérieure (°C)	Hibertex Pro + Airlock		Hibertex Pro + AirGuard		Hibertex Pro plastifié		Arbo-Pro seul		Hibertex seul
		Temp. (°C)	Δt (°C)	Temp. (°C)	Δt (°C)	Temp. (°C)	Δt (°C)	Temp. (°C)	Δt (°C)	Temp. (°C)
Minimum	-25,3	-11,0	-8,3	-10,3	-11,5	-14,2	-7,5	-17,2	-5,7	d.m.
Maximum	30,3	39,8	+26,2	35,3	+19,8	36,8	+20,1	36,0	+20,7	d.m.

Tableau 2: Température minimale et maximale extérieure, sous les systèmes, ainsi que le plus grand écart positif et négatif instantané entre la température extérieure et celle sous chacun des systèmes, du 21 décembre 2011 au 20 mai 2012. Les Δt correspondent au plus faible/important réchauffement (refroidissement si négatif) sous le système p/r à la température extérieure. d.m. = donnée manquante.

Après le redoux du 1 au 2 janvier 2012 (illustration 10, point A) qui fit fondre une quantité importante du couvert nival, les températures sous l'Arbo-Pro et l'Hibertex Pro plastifié s'approchaient plus des températures extérieures, particulièrement la nuit (avant le point E). Les conditions de vent semblent avoir aussi une influence sur l'Arbo-Pro et l'Hibertex Pro qui étaient alors sans couvert nival puisqu'on constate que leur température remonte légèrement au point K alors que le vent diminue. Avec peu ou pas de neige (illustration 10, point E), certains systèmes n'offrent que 1 °C de protection alors que d'autres sont encore à 10 °C. La différence est peut-être attribuable au manque d'étanchéité du système Arbo-Pro face aux autres modalités ou encore au manque d'étanchéité de l'installation.

Nombre d'heures où la température était inférieure à	Extérieur (h)	Hibertex Pro + Airlock	Hibertex Pro + AirGuard	Hibertex Pro plastifié	Arbo-Pro seul	Hibertex seul
< -10	475	11	2	43	101	d.m.
< -12	343	0	0	12	46	d.m.
< -14	250	0	0	1	17	d.m.
< -16	170	0	0	0	4	d.m.
< -18	90	0	0	0	0	d.m.
< -20	51	0	0	0	0	d.m.
< -22	26	0	0	0	0	d.m.
< -24	10	0	0	0	0	d.m.
< -26	0	0	0	0	0	d.m.

Tableau 3: Histogramme du nombre d'heures sous des seuils de températures à l'intérieur des systèmes, du 21 décembre 2011 au 20 mai 2012. d.m. = données manquantes.

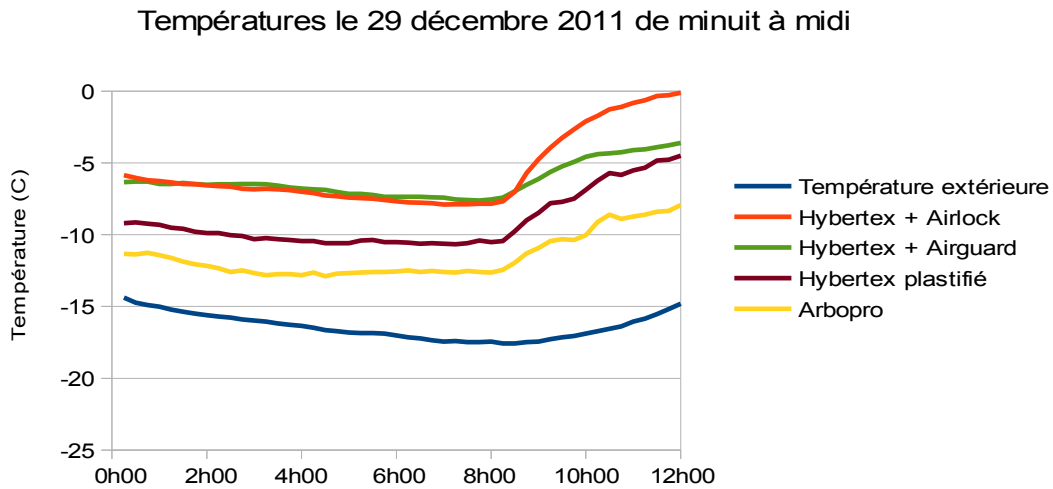


Illustration 8: Températures le 29 décembre 2011 de minuit à midi, froid sans couvert nival.

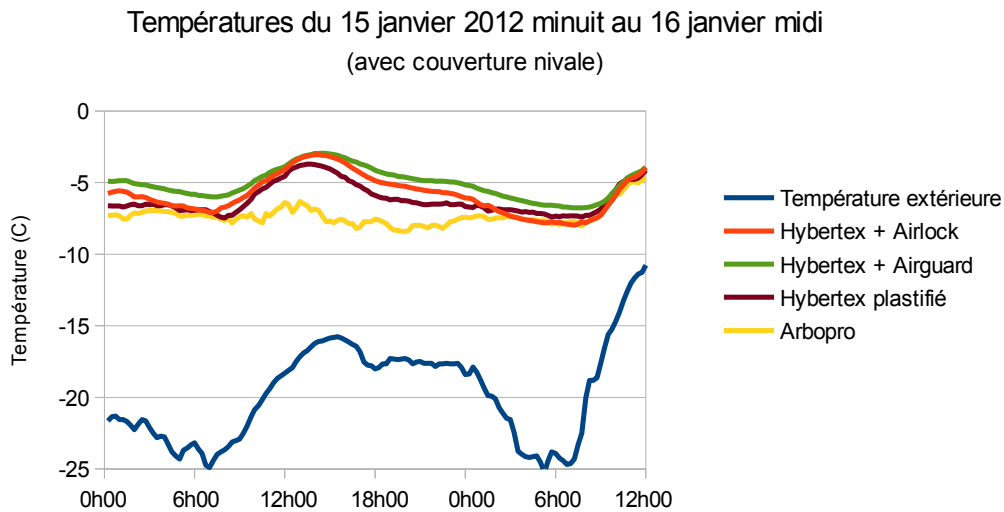


Illustration 9: Nuit la plus froide. Température du 15 janvier 2012 minuit au 16 janvier midi, avec un couvert nival complet.

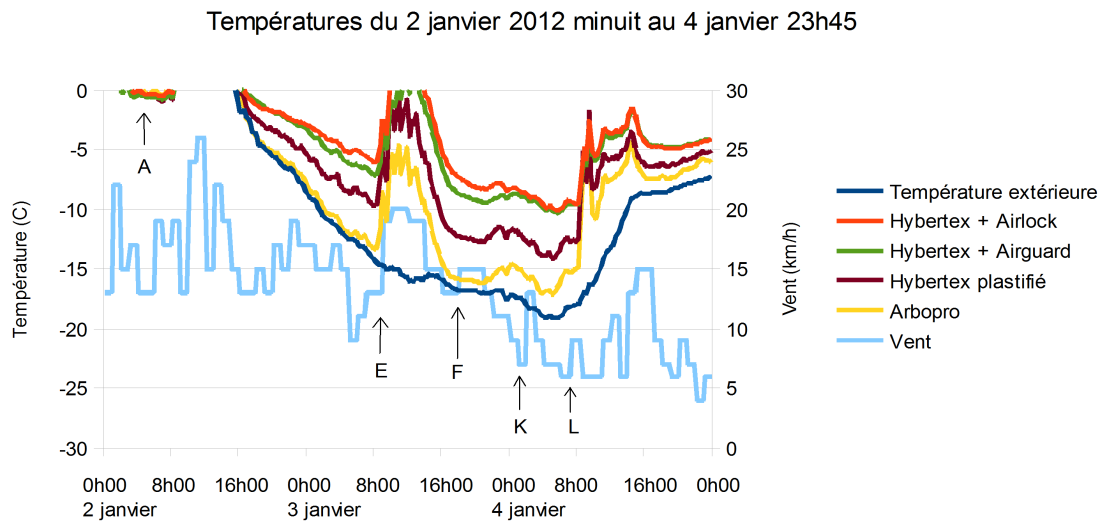


Illustration 10: Températures pour les trois jours du 2 janvier 2012 minuit au 4 janvier 23h45 après une fonte presque totale du couvert nival. Point A = fonte du couvert nival. Point E = lever du soleil et chute de la température extérieure. Point F = coucher du soleil et chute de température. Point K = diminution du vent. Point L = lever du soleil.

3.3 Survie des bourgeons primaires

Une évaluation de la survie des bourgeons à l'hiver a été effectuée le 25 mai 2012, soit cinq jours après avoir retiré les protections. Comme le montre l'illustration 11, à ce moment la vigne avait atteint le stade 15-17 Eichorn-Lorenz sous les systèmes. Ainsi, la détermination des bourgeons primaires vivants était aisée. En tout, 1 543 bourgeons furent examinés.

L'illustration 12 présente le taux de survie des bourgeons primaires au printemps 2012 pour les différents traitements. Les données recueillies n'étaient pas tout à fait conformes à une distribution normale, mais très proche. On peut quand même souligner que les traitements ne sont pas significativement différents. Les moyennes sont toutes groupées dans la gamme de 72 à 80% de survie.



Illustration 11: Le début de la floraison (stade E.L. 19/BBCH 60) de Maréchal Foch était atteint sur quelques ceps le 25 mai 2012, soit cinq jours après l'enlèvement des protections. Photo : Raphaël Fonclara.

Taux de survie des bourgeons primaires, hiver 2011-2012

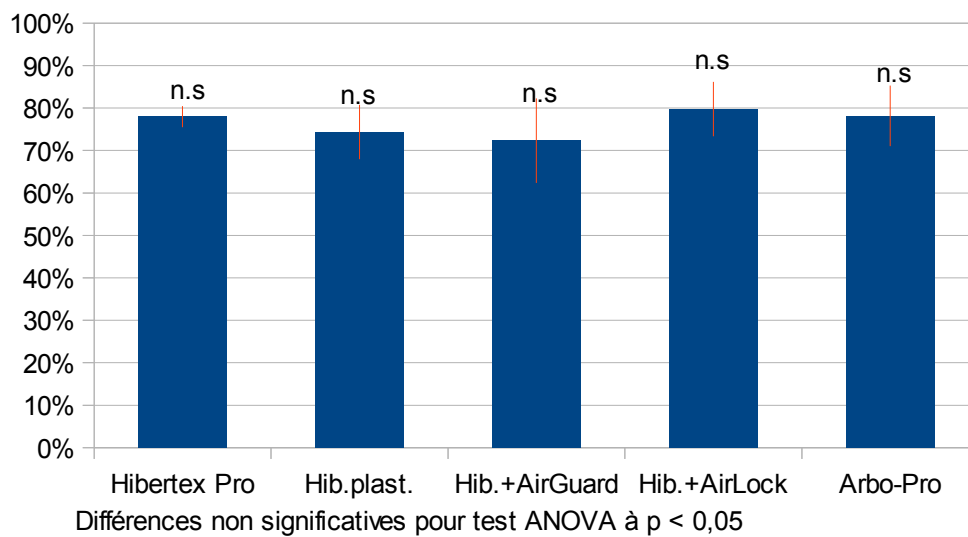


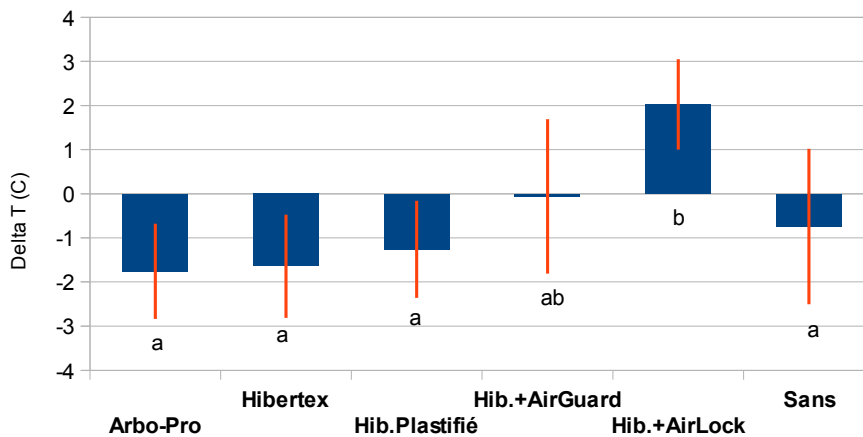
Illustration 12: Taux de survie des bourgeons primaire, hiver 2011-2012.

3.4 Température du sol

Les illustrations 13 et 14 montrent la différence de température à la surface du sol tel que mesurée sous les systèmes et celle au centre de l'allée (exposé à la lumière du jour) par une journée nuageuse de printemps (illustration 13) et ensoleillée (illustration 14). Le thermomètre infrarouge étant malheureusement tombé en panne de piles en cours de prise des données le 19 avril 2012, le nombre d'observations est incomplet.

Les données indiquent que la surface du sol est généralement plus froide sous les systèmes, soit à l'ombre des géotextiles, que le sol au centre des allées, à l'exception du traitement Hiber-tex + AirGuard qui a été significativement plus chaud de 2 à 3 °C en conditions nuageuses que les autres traitements. La différence de température est plus importante en conditions ensoleillées (illustration 14) alors que les traitements donnent une protection solaire de 5 à 8 °C, légèrement plus prononcée sur les systèmes à géotextiles + pare-air.

Différence de température à la surface du sol sous les toiles p/r au sol dans l'allée par un après-midi chaud et plutôt nuageux de printemps (T_{air} = 17 °C)



Lettres différentes si différence significative pour test Waller-Duncan au rapport k=100, équivalent à p < 0,05

Illustration 13: Différence de température du sol sous les systèmes et celle au centre de l'allée, par un après-midi chaud et nuageux de printemps (sans neige, 23 mars 2012). Une valeur supérieure à zéro indique que le sol est plus chaud sous le système que dans l'allée.

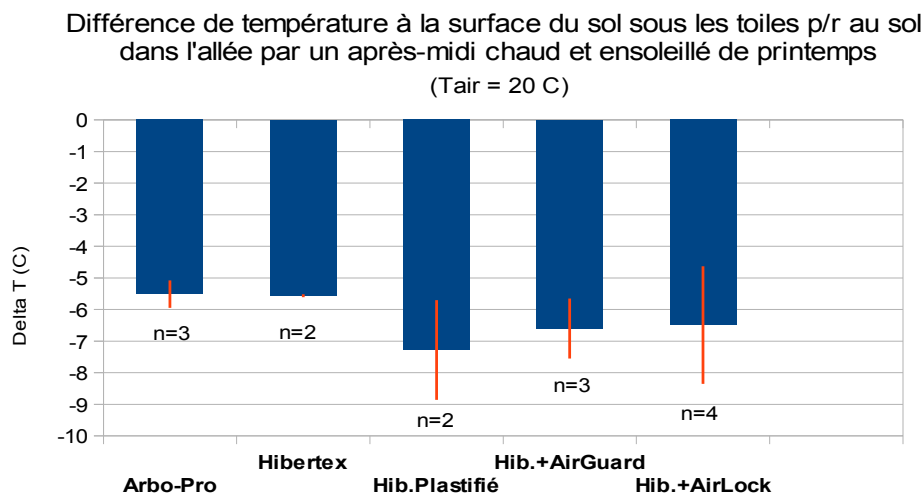


Illustration 14: Différence de température du sol sous les systèmes et celle au centre de l'allée, par un après-midi chaud et ensoleillé de printemps (sans neige, 19 avril 2012). `n` indique le nombre d'observations.

3.5 Échaudage

Au printemps 2012, les températures maximales sous les systèmes ont atteint 35,3 °C à 39,8 °C, alors que la température maximale de l'air ambiant a été de 30,3 °C (tableau 2). Tous les systèmes ont augmenté de façon importante le nombre d'heures où la vigne était exposée à des températures supérieures à 30 °C (tableau 4), le seuil où les stomates se ferment (Carbonneau *et al.*, 2007). La modalité Hybertex Pro + AirLock se démarque des autres avec 90 heures, soit près de deux fois plus que les autres traitements.

À l'enlèvement des systèmes en 2010 et 2012, les feuilles et sarments débourrés avaient une couleur verte normale. Cependant, en 2010 les deux modalités qui étaient munies d'un matériel entièrement opaque (aluminé réfléchissant) montraient des tissus très pâles presque blancs, mais n'avaient pas subi d'échaudage, peut-être grâce aux conditions nuageuses qui prévalent le jour de l'enlèvement. Ainsi, la préservation des systèmes sur la vigne longtemps après son débourrement ne semble pas entraver le processus de photosynthèse ni provoquer un échaudage de la culture à l'enlèvement de ceux-ci pour autant qu'ils laissent passer un peu la lumière.

	Extérieur (h)	Hibertex Pro + Airlock	Hibertex Pro + AirGuard	Hibertex Pro plastifié	Arbo-Pro seul	Hibertex seul
Nombre d'heures où la température ≥ 30 °C	1	90	46	52	45	d.m.

Tableau 4: Nombre d'heures au printemps 2012 où la température a dépassé 30 °C, soit jusqu'à l'enlèvement des systèmes le 20 mai 2012. d.m. = données manquantes.

3.6 Longueur des sarments débourrés

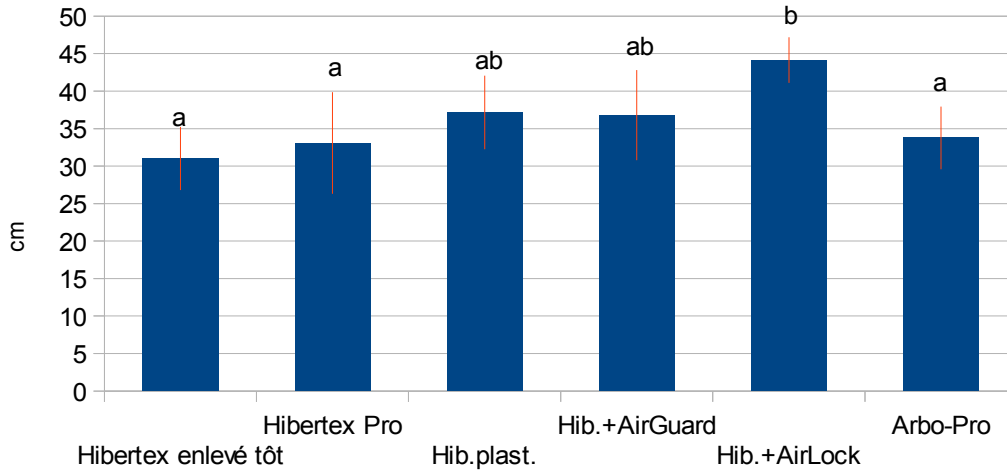
Parmi les 1 543 bourgeons examinés, la longueur moyenne des 1 236 sarments débourrés juste après l'enlèvement des systèmes est montrée à l'illustration 15. Il met en perspective "l'effet serre" du système de protection alors qu'il est laissé sur la vigne longtemps après le débourement, jusqu'à ce que les risques de gel soient passés. La longueur des sarments de la modalité Hibertex Pro + AirLock s'est démarquée des autres modalités, mais plus généralement toutes les modalités avec un pare-air (Polyéthylène microperforé, AirLock et AirGuard) ont produit des sarments significativement plus longs.

Le traitement « Hibertex Pro seul » qui avait été enlevé tôt en mars a provoqué une longueur moyenne de 3 à 14 cm inférieure aux autres traitements. Sa longueur moyenne est inférieure ou égale à l'écart types des autres traitements. On observe une certaine tendance pour accélérer le développement des sarments lorsqu'on garde les protections de façon prolongée. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que le nombre d'heures où la température se situe à l'intérieur de la gamme optimale de croissance (Carbonneau *et al.*, 2007) est de 19 à 29% plus important sous les systèmes que la température extérieure (tableau 5).

	Extérieur (h)	Hibertex Pro + Airlock	Hibertex Pro + AirGuard	Hibertex Pro plastifié	Arbo-Pro seul	Hibertex seul
Nombre d'heures où la température entre 10 et 30 °C	630	813	791	750	746	d.m.
Écart p/r à température extérieure	-	+29%	26%	19%	19%	-

Tableau 5: Nombre d'heures au printemps 2012 où la température s'est située entre 10 et 30 °C, soit jusqu'à l'enlèvement des systèmes le 20 mai 2012. d.m. = données manquantes.

Longueur des sarments débouffés issus des bourgeons primaires
Hiver 2011-2012



Lettres différentes si différence significative pour test Waller-Duncan au rapport $k=100$, équivalent à $p < 0,05$

Illustration 15: Longueur des sarments primaires débouffés, hiver 2011-2012.

3.7 Analyse climatologique

Nous avons constaté précédemment que les systèmes sont moins performants avec un faible couvert nival. Nous analysons ici le climat du passé récent pour identifier la probabilité ou des conditions très froides surviennent simultanément à un faible couvert nival.

Le tableau 6 recense le nombre de jours par année où deux critères étaient réunis, soit 1-une température inférieure à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 2-une couverture nivale inférieure à 12 cm, pour la période de novembre 2002 à février 2013. Pour plus de précision, le tableau présente la température selon un intervalle de deux degrés de -20 à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le critère de 12 cm de neige au sol fut sélectionné car cela correspond au même facteur d'isolation thermique en régime stationnaire que la toile isolante utilisée par Jolivet (2006). Par ailleurs, des travaux ont déjà démontré qu'une accumulation de 15 cm de neige fraîche au-dessus des bourgeons pouvait les protéger d'écarts de température journalière importants (Jolivet *et al.*, 2000a, 2000b, 2006). Les données pour l'hiver 2012-13 sont incomplètes et fournies au tableau 6 seulement à titre indicatif.

Le tableau 7 établit la probabilité que la température extérieure soit inférieure aux seuils alors que la protection offerte par le couvert nival est inférieure à 5, 12 et à 20 cm, basé sur l'historique des hivers de novembre 2002 à avril 2012.

Par exemple, pour un cépage tel Maréchal Foch avec un seuil de cryotolérance à $-26,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Quamme, 1986), les données indiquent que la probabilité est de 40% que survienne un hiver qui présente des températures plus froides que son seuil de dommage, soit 4 années sur 10

pour le seuil de 12 cm de couvert nival. Pour diminuer cette probabilité à 10%, un dispositif offrant au moins 4 °C de protection de plus que le couvert nival est nécessaire, soit pour atteindre la probabilité au seuil de -30 °C au tableau. Autre exemple, pour un cépage de famille *Vitis vinifera* avec un seuil de cryodommage de -22 °C, la probabilité est de 80% à 12 cm et nécessiterait une protection de 8 °C supérieure au couvert nival pour diminuer cette probabilité à 10%.

Hiver	Seuils (°C)						Température minimum (°C)	Neige au sol maximale (cm)
	≤ -20	≤ -22	≤ -24	≤ -26	≤ -28	≤ -30		
2002-03	24	16	12	7	2	0	-28	21
2003-04	13	12	9	6	1	0	-28	30
2004-05	15	10	6	3	1	1	-31	22
2005-06	4	3	1	1	0	0	-26	27
2006-07	9	6	3	0	0	0	-28	25
2007-08	9	6	3	0	0	0	-28	42
2008-09	1	0	0	0	0	0	-27	42
2009-10	1	1	0	0	0	0	-29	48
2010-11	2	0	0	0	0	0	-23	24
2011-12	3	1	0	0	0	0	-28	56
2012-13*	10	6	2	1	0	0	-28	30

Tableau 6: Tableau du nombre de jours par année où la température est inférieure au seuil alors que la couverture nivale est inférieure à 12 cm, de la température minimale et du couvert nival maximal pour les 11 hivers de 2002 à 2013 (Station Sainte-Martine).

* Année incomplète, données jusqu'au 11 février 2012 seulement.

	Seuils (°C)					
	≤ -20	≤ -22	≤ -24	≤ -26	≤ -28	≤ -30
Probabilité à 5 cm de couvert nival	70%	60%	50%	30%	20%	0%
Probabilité à 12 cm de couvert nival →	100%	80%	60%	40%	30%	10%
Probabilité à 20 cm de couvert nival	100%	90%	80%	80%	50%	10%

Tableau 7: Probabilité que la température soit inférieure au seuil au moins une fois durant l'hiver alors que la couverture nivale est inférieure à 5, 12 et 20 cm, basé sur l'historique des hivers de novembre 2002 à avril 2012 (Station Sainte-Martine).

3.8 Coûts des systèmes

Le coût d'achat des composantes principales des différents systèmes utilisés dans ce projet est rapporté au tableau 8. Les coûts n'incluent pas la main d'œuvre pour l'installation et l'enlèvement, ni le coût des agrafes et de l'entreposage.

Résultats

Systeme	Coût d'achat
Hibertex Pro	1,14 ² \$/m ²
Hibertex Pro plastifié	1,70 ² \$/m ²
Hibertex Pro + AirGuard	1,14 + 1,01 ³ = 2,15 \$/m ²
Hibertex Pro + AirLock	1,14 + 1,02 ³ = 2,16 \$/m ²
Arbo-Pro	1,14 ² \$/m ²

Tableau 8: Coût d'achat des composantes principales.

²Prix de gros 2013.

³Prix de détail 2013, il n'inclut pas l'assemblage avec le géotextile (couture, adhésif, autre ?).

4 Discussion

L'hiver 2011-2012 a été relativement facile pour le cépage Maréchal Foch avec des températures minimales n'atteignant que marginalement le seuil de dommage potentiel de $-26,8\text{ °C}$ (Quamme, 2006). De plus, une chute de neige a précédé la période de froid la plus intense. Malgré cela, on peut tirer plusieurs constats des résultats obtenus.

Tous les systèmes ont permis de protéger adéquatement la vigne de la température minimale extérieure de $-25,3\text{ °C}$ atteinte le 16 janvier 2012 (tableau 2 ; illustration 8). Les taux de survie des bourgeons primaires furent bons et équivalents pour tous les traitements (illustration 12). On observe une nette diminution du nombre d'heures d'exposition au froid le plus intense avec tous les systèmes étudiés (tableau 3), légèrement plus avantageuse pour les systèmes munis d'un pare-air (Hibertex Pro plastifié, Hibertex Pro + AirGuard, Hibertex Pro + AirLock).

La résistance thermique de conduction d'un élément ou d'une composante comme les géotextiles exprime sa résistance au passage d'un flux de conduction thermique. Cette résistance s'applique aux solides ainsi qu'aux fluides (liquide ou gaz) immobiles. Toutefois, cette notion n'est valable qu'en régime stationnaire, le régime transitoire comme avec l'air ambiant extérieur, fait appel à des notions plus complexes tel que la méthode de quadripôle thermique (Maillet *et al.*, 2000), notion dépassant les objectifs de ce rapport. Malgré cela, on notera que même si les matériaux présentent une certaine résistivité thermique, la chaleur maintenue sous les systèmes pourrait dépendre grandement de la capacité des géotextiles à réfléchir la chaleur radiative du sol. La conservation d'une température plus élevée sous les systèmes que celle de l'air extérieur dépend, dans ce contexte, aussi du bilan radiatif dans la bande spectrale thermique. Même si un matériau est peu conducteur, comme c'est le cas des géotextiles, leur masse thermique demeure faible et donc nécessite que très peu d'énergie pour faire varier leur température. Or, leur échauffement en cette situation sans vent (flux non radiatif), pourrait être même prépondérant. L'aluminium possède cette propriété physique d'être imperméable aux infrarouges. Les toiles qui en sont enduites devraient, en théorie, minimiser les pertes de chaleur dans cette fenêtre thermique. Toutefois, les toiles aluminées utilisées en 2009-2010 avaient causé des problèmes culturels au printemps. Ainsi, des matériaux novateur pourraient être recherchés, laissant passer une partie de la lumière visible, tout en réfléchissant une bonne partie de l'infrarouge vers l'intérieur du système. Des essais devraient être menés en ce sens car ils seraient particulièrement d'intérêt en situation où il y a peu d'enneigement.

Le régime de température sous les systèmes couverts neige (illustration 9) peut néanmoins être comparé à celui sans neige (illustration 8). Comme l'avaient aussi constaté Jolivet et Dubois (2006), on remarque que le couvert de neige influence de façon significative la température à l'intérieur du système. De plus, la neige couvrant les systèmes fournit non seulement un facteur d'isolation important, mais semble aussi en améliorer l'étanchéité (illustration 10, point K), favorisant le maintien des températures plus près d'un régime stationnaire. Le point K est d'un intérêt particulier, car il a lieu la nuit avec peu de neige, donc sans chauffe par le soleil. On constate que la température à l'intérieur de tous les systèmes augmente d'environ 2 °C en conditions moins venteuses. Cela souligne l'importance d'une installation soignée, peu importe le type de produit utilisé. Il semble y avoir un léger avantage des pare-air en conditions venteuses (illustration 10) ou sans neige (illustration 8), mais la qualité de l'étanchéité de l'installation est vraisemblablement prépondérante sur la perméabilité des géotextiles. Toutefois, l'interprétation sur la base de la température sous les systèmes est risquée parce les températures n'étaient mesurées que sous une seule répétition.

Les conditions venteuses qui sont survenues avant que le sol ne gèle ou soit recouvert de neige ont mis à rude épreuve les systèmes, particulièrement ceux composés de deux matériaux. Le Arbo-Pro seul, Hibertex Pro seul et Hibertex Pro plastifié ont bien tenu, mais le Hibertex Pro + AirLock et Hibertex Pro + AirGuard, soit les systèmes que le pare-air n'était pas cousu ou laminé au géotextile, ont été emporté par le vent et ont nécessité un ancrage supplémentaire. Ainsi, si un pare-air est utilisé, un laminage ou la couture du pare-air avec le géotextile diminue les risques que la qualité de l'installation soit compromise par les vents. Il est aussi recommandable de visiter les parcelles fréquemment en début d'hiver afin de corriger d'éventuelles défaillances.

Avec une couverture nivale complète, nous pouvons affirmer que tous les systèmes performant de façon équivalente. Par contre, avec une couverture nivale partielle ou faible, l'expérimentation ne permet pas de faire une affirmation sur les différences entre les modalités principalement parce que 1-des thermomètres n'étaient installés que dans une seule des répétitions de chaque traitement, et 2-les seules conditions de températures susceptibles de causer des dommages qui sont survenus durant l'hiver 2011-2012 l'ont été avec un couvert nivale complet. À l'analyse climatologique pour la région à l'étude, la probabilité que des températures létales surviennent sans couvert de neige est importante (tableau 7). Certains travaux tendent à démontrer qu'ils pourraient devenir encore plus fréquents (Jolivet, 2007) alors que d'autres croient le contraire (Jones, 2012) quoique ce dernier n'avait pas tenu compte de la disparition du couvert nivale par les redoux. Pour un cépage moyennement rustique tel que Maréchal Foch (-26,8 °C), la probabilité est de 4 sur 10 qu'un hiver subisse une température inférieure à -26 °C alors que la couverture nivale est inférieure à 12 cm, et grimpe à 8 sur 10 au seuil de 20 cm. Pour diminuer la probabilité de 10%, le système devrait offrir une protection de 4 °C alors que le couvert nivale est inférieur à 12 cm, une performance qui n'a pu être confirmée dans cette étude dû au manque de répétitions sur les capteurs de température et aux conditions météorologiques plutôt favorables qui ont eu lieu à l'hiver 2011-2012. Une étude plus approfondie sur cet aspect serait à faire. Dans un tel contexte, il serait avantageux de connaître plus précisément l'évolution de la rusticité pendant l'hiver en mesurant celle-ci périodiquement par analyse thermique différentielle (*Differential Thermal Analysis – DTA*), tel que décrit par Quamme (1986).

Tous les systèmes ont permis d'éviter la formation de trous de fonte de neige le long des troncs et sarments, ce qui auraient pu augmenter l'exposition des sarments aux éléments (Carrière, 2001).

Au printemps, tous les systèmes, mais particulièrement ceux avec un pare-air, diminuent de 6 à 8 °C la température à la surface du sol près des plants lorsqu'il fait soleil (illustration 14), mais ont tendance à l'augmenter légèrement en conditions nuageuses (illustration 13). Comme les conditions à faible luminosité sont plus fréquentes, notamment à cause de la durée de la nuit, c'est peut-être ce qui explique que tous les traitements avec pare-air provoquent une pousse plus prononcée des sarments au printemps (illustration 15). Peu avant le débourrement, lorsque la température du sol atteint 10 à 12 °C, la vigne accélère le catabolisme de l'amidon produisant la circulation de glucides grâce à l'augmentation de la pression osmotique conséquente, ce qui permet le développement des structures reproductrices et végétatives au printemps (Zapata, 1998 ; Carbonneau et al., 2007). La vigne fonctionne ainsi sur ses réserves jusqu'à ce que les quantités de glucides produites par photosynthèse soient suffisantes pour combler ses besoins. La transition se produit sur vinifera vers 2 à 3 semaines avant floraison (Zapata, 1998). Lorsque la transition tarde à se faire, les risques de coulure augmentent surtout sur les cépages sensibles (Zapata, 1998 ; Lebond, 2005). Ainsi, le maintien des systèmes sur la vigne pour une plus longue durée pourrait diminuer la capacité photosynthétique par diminution de l'intensité lumineuse et/ou diminution de la disponibilité du CO₂ atmosphérique, mais cela devrait faire l'objet d'autres études. Dans les cas expérimentés en 2009-10 et 2011-12, les systèmes sont restés longtemps sur la vigne après le débourrement et aucun traitement n'a subi d'échaudage. Sur les deux années d'expérimentation, les feuilles et sarments avaient une couleur verte normale à l'enlèvement tardif des systèmes, sauf les deux modalités de 2009-2010 qui étaient munies d'un film opaque aluminé. Dans les conditions expérimentées, la préservation des systèmes sur la vigne après son débourrement ne semble pas entraver le processus de photosynthèse ni provoquer un échaudage de la culture à l'enlèvement de ceux-ci pour autant qu'ils laissent passer un peu la lumière. De plus, bien que la coulure n'ait pas été évaluée quantitativement, la parcelle a été l'objet d'une récolte commerciale en 2012 de 7,9 t/ha, jugée homogène et particulièrement hâtive. Il faut aussi remarquer que le fait de garder les systèmes sur la vigne jusqu'après le débourrement empêche tous les traitements phytosanitaires, un inconvénient à pondérer.

Dans cette étude, la supériorité des systèmes muni d'un pare-air n'a pas été démontrée statistiquement. Dans ce contexte, leurs coûts plus importants (tableau 8) ne s'est pas justifié.

5 Conclusion

À l'hiver 2011-12, tous les systèmes ont permis de protéger adéquatement la vigne de la température minimale extérieure de $-25,3\text{ °C}$ atteinte le 16 janvier 2012, un hiver qui fut peu stressant. Les taux de survie des bourgeons primaires furent bons et équivalents pour tous les traitements. On observe une nette diminution du nombre d'heures d'exposition au froid le plus intense avec tous les systèmes étudiés, légèrement plus avantageuse pour les systèmes munis d'un pare-air (Hibertex Pro plastifié, Hibertex Pro + AirGuard, Hibertex Pro + AirLock).

De plus, la neige couvrant les systèmes est non seulement un facteur d'isolation important, mais semble aussi en améliorer l'étanchéité, favorisant le maintien des températures plus près d'un régime thermique stationnaire. Cela souligne l'importance d'une installation soignée, peu importe le type de produit utilisé. Les systèmes munis d'un pare-air semblent avoir un léger avantage en conditions venteuses ou sans neige, mais la qualité de l'étanchéité de l'installation est vraisemblablement prépondérante sur la perméabilité des géotextiles. Des travaux sur l'amélioration de la robustesse des installations et la qualité de l'étanchéité seraient souhaitables.

Une couverture nivale des systèmes, même partielle, confère quelques degrés de protection, mais reste une entreprise périlleuse si les conditions sont à la fois venteuses (étanchéité) et que la température s'approche de la température de cryodommage du cépage. L'analyse climatologique indique qu'il est très probable que des conditions froides surviennent, pour le site étudié, alors que le couvert nivale ne favorise pas une protection avantageuse par les géotextiles.

Les systèmes se sont montrés capables de rester sur la vigne après le débourrement sans causer de dommages apparents. D'autres travaux seraient requis pour vérifier si cette technique peut provoquer de la coulure et principalement d'en vérifier la faculté à protéger de dommages causés par le gel printanier.

Globalement, cette étude n'a pas permis de déterminer statistiquement si un système conçu d'un géotextile plus un pare-air est supérieur à un système muni d'un géotextile seul, ni d'ailleurs si un type de pare-air est supérieur à un autre. Conséquemment, considérant les coûts plus élevés des systèmes munis d'un pare-air, la valeur économique de ceux-ci n'est pas démontrée.

Finalement, des doutes subsistent quant à la durabilité à long terme des systèmes de protection par géotextile, du moins pour les sites où surviennent des redoux occasionnels, et d'autres travaux sont requis avant de pouvoir en faire la recommandation.

6 Point de contact pour informations supplémentaires

Fabien Gagné
Viticulteur
Vignobles Saint-Rémi
2045, rang Notre-Dame
Saint-Rémi, QC J0L2L0
CANADA
Téléphone : 514-240-1482
Courriel : fabien.gagne @ saintremi.ca

7 Références

- ALOIR-ROY, A.-N., 2003.** Étude comparative du rendement des ceps de Seyval Blanc, protégés du gel par la neige naturelle, par la neige artificielle et par buttage, au vignoble Sous les Charmilles à Rock Forest, Québec. U. Sherbrooke, Mémoire de maîtrise.
- ALOIR-ROY, A.-N., DUBOIS, J.-M., FONTAINE, L., 2004.** Rendement du Seyval Blanc dans un vignoble du Québec suite à l'essai de protections hivernales de neige artificielle, de neige naturelle et de feuilles, U. Sherbrooke, 143 p.
- ATLAS AGROCLIMATIQUE DU QUÉBEC, 2012.** Températures extrêmes, climat actuel, probabilité 2 années sur 10. http://dev.agrometeo.org/atlas/category/temperatures_extrêmes/therm/true accédé le 5 octobre 2012
- CARBONNEAU, A., DELOIRE A., JAILLARD B., 2007.** La vigne – Physiologie, terroir, culture. Dunot, 442 p. et annexes.
- CARRIÈRE, B., 2001.** Formation et évolution des trous de fonte le long des sarments de vigne pendant l'hiver 2001 au vignoble Sous les Charmilles, Rock Forest (Québec). U. Sherbrooke et U. de Savoie, Mémoire de maîtrise, 117 p.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 2013.** Archives nationales d'information et de données climatologiques – Rapport des données quotidiennes pour Ste-Martine Québec Canada. http://www.climat.meteo.gc.ca/climateData/dailydata_f.html?timeframe=2&Prov=QUE&StationID=5503&dlyRange=1963-01-01|2012-12-31&Year=2012&Month=12&Day=01 accédé le 14 février 2013.
- JOLIVET, Y., DUBOIS, J.-M., GRANBERG, H., 1998a.** Expérience sur le comportement thermique hivernal d'un *Vitis vinifera* sans protection artificielle. In vino veritas (Association des vignerons du Québec), 2:4, p. 6.
- JOLIVET, Y., DUBOIS, J.-M., GRANBERG, H., 1998b.** Évaluation du régime thermique du cépage *Vitis vinifera* L. var. Melon durant la saison froide au Québec. *J. int. Des sciences de la vigne et du vin*, Bordeaux (France), 32:2, p. 51-58.
- JOLIVET, Y., DUBOIS, J.-M., 2000a.** Évaluation préliminaire de l'enneigement artificiel comme méthode de protection hivernale de la vigne au Québec. *J. int. des sciences de la vigne et du vin*, Bordeaux (France), 34:4, 155-167.
- JOLIVET, Y., DUBOIS, J.-M., 2000b.** Évaluation du buttage de la vigne comme méthode de protection contre le froid hivernal au Québec. *J. int. des sciences de la vigne et du vin*, Bordeaux (France), 34:3, p.93-92.
- JOLIVET, Y., DUBOIS, J.-M., 2006.** Essais de protection hivernale de la vigne hybride au moyen d'une toile isolante avec un fil chauffant. U. Sherbrooke, bul. rech. 180, Bibliothèque nationale, Ottawa, 20 p.

- JOLIVET, Y., 2007.** Impact du réchauffement climatique sur la culture de la vigne durant la saison froide au Québec (Canada). OIV, XXX^{ième} conférence mondiale de la vigne et du vin. Budapest (Hongrie). 6 p.
http://www.oiv2007.hu/documents/viticulture/273_yvon_jolivet_communication_oiv.pdf accédé le 5 octobre 2012.
- JONES, G.V., 2007.** Climate change : Observations, projections, and general implications for viticulture and wine production. *Practical Winery and Vineyard*, p. 44-64.
- JONES, N., 2012.** The influence fo recent climate change on wine regions in Quebec, Canada. *J. Wine Research*, 23-2, p. 103-113.
- KHANIZADEH, S., REKIKA, D., LEVASSEUR, A., GROLEAU, Y., RICHER, C., FISHER, H., 2002.** Effet de différents facteurs cultureux et environnementaux sur la croissance, la rusticité et le rendement des vignes, dans trois localités. Agriculture et agroalimentaire Canada, 31 p.
http://www.agrireseau.qc.ca/petitsfruits/documents/yield_vigour_mortality-f.pdf accédé le 5 octobre 2012.
- LEBON, G., 2005.** Importance des glucides lors de la floraison chez la vigne (*Vitis vinifera L.*) - exemples de cépages présentant une sensibilité différente à la coulure. Thèse. U. Reims Champagne-Ardenne (France), 158 p.
- MAILLET, D., ANDRÉ, S., BATSALE, J.-C., DEGIOVANNI, A., MOYNE C., 2000.** Thermal quadrupole : Solving the heat equation through integral transforms. Wiley, 388 p.
- PLOCHER, T.A., PARKE R.J., 2001.** Northern winework. Eau Claire Printing Co., Minnesota, 178 p.
- TATE, A.B., 2001.** Global warming's impact on wine. *Journal of Wine Research*, 12(2), 95-109.
- TELEBAK, T., 2000.** Évaluation des rendements en fonction de différents moyens de protection de la vigne contre le gel hivernal au Québec. U. Sherbrooke, Mémoire de maîtrise, 115 p.
- TELEBAK, T., JOLIVET, Y., DUBOIS, J.-M., 2002.** Évaluation préliminaire du rendement d'un cépage hybride (Seyval Blanc), en fonction de différents moyens de protection contre le gel hivernal au Québec. *J. int. des sciences de la vigne et du vin*, Bordeaux (France), 37:1, p. 1-13.
- QUAMME, H. A., 1986.** Use of thermal analysis to measure freezing resistance of grape buds. *Canadian J. of Plant Science*, 66(4), p. 947-952
- ZAPATA, C., 1998.** Suivi pluriannuel de la mise en place et de la mobilisation des réserves carbonnées et azotées chez deux cépages de vigne (*Vitis vinifera L.*) présentant une sensibilité différente à la coulure. Thèse, I.N.A. Paris Grignon, 107 p.

Appendice 1 : Schéma du dispositif expérimental de 2011-2012

Plan en blocs complets aléatoires, dispositif utilisé pour l'expérimentation 2011-2012.

	(garde)	(garde)	(garde)	(garde)	(garde)	(garde)	
Bloc 4	(garde)	Hib.+airguard	Hib.plastifié	Arbopro	Hibertex	Hib.+airlock	(garde)
Bloc 3	(garde)	Hibertex	Hib.+airlock	Hib.plastifié	Arbopro	Hib.+airguard	(garde)
Bloc 2	(garde)	Hib.+airlock	Hib.+airguard	Hibertex	Arbopro	Hib.plastifié	(garde)
Bloc 1	(garde)	Hib.+airguard	Hib.plastifié	Hib.+airlock	Hibertex	Arbopro	(garde)
	(garde)	(garde)	(garde)	(garde)	(garde)	(garde)	(garde)
	Rangée A15	Rangée A14	Rangée A13	Rangée A12	Rangée A11	Rangée A10	Rangée A9