

Simulations numériques micro-échelles et mesures de terrain du climat lors d'un gel de printemps sur un vignoble équipé de tours antigels

Clara Le Cap, Johan Carlier, Hervé Quénol, Dominique Heitz, Emmanuel Buisson

▶ **To cite this version:**

Clara Le Cap, Johan Carlier, Hervé Quénol, Dominique Heitz, Emmanuel Buisson. Simulations numériques micro-échelles et mesures de terrain du climat lors d'un gel de printemps sur un vignoble équipé de tours antigels. Changement Climatique et Territoires (XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie), 2020, Rennes, France. pp.421-426. hal-03087610

HAL Id: hal-03087610
https://hal.science/hal-03087610

Submitted on 13 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SIMULATIONS NUMERIQUES MICRO-ECHELLES ET MESURES DE TERRAIN DU CLIMAT LORS D'UN GEL DE PRINTEMPS SUR UN VIGNOBLE EQUIPE DE TOURS ANTIGELS

LE CAP C.[1,2,3], CARLIER J.[2], QUENOL H.[3], HEITZ D.[2], BUISSON E.[1]

1 Weather Measures, Clermont-Ferrand, France (clara.le-cap@inrae.fr)
2 INRAE, UR OPAALE, Rennes, France
3 CNRS, UMR 6554 LETG, Université Rennes 2, Rennes, France

Résumé : *Les gelées printanières sont particulièrement dévastatrices pour les exploitations viticoles. Un des moyens de protéger les vignobles est le recours aux tours antigel. Toutefois, des lacunes persistent aujourd'hui sur l'action de la tour sur son environnement et sur l'implantation et l'asservissement de leur fonctionnement en fonction de la prévision locale du risque gélif. Pour faire face à cet enjeu, la CUMA des vignobles de Quincy (France) s'est associée à différents partenaires dans le cadre du projet SICTAG. Ce projet a pour objectif d'initier une démarche visant l'automatisation de la gestion d'un parc de tours antigel. Des réseaux de capteurs seront implantés dans le vignoble et des simulations numériques (WRF et OpenFOAM) seront réalisées pour caractériser le fonctionnement des tours et pour concevoir des modèles prédictifs du risque gélif à la micro-échelle du terroir. Il s'agit ici d'asservir le fonctionnement individuel des tours à des mesures de terrain pour prémunir la parcelle contre le risque de gel, et ceci de manière efficiente et à moindre coût énergétique.*

Mots clés : *gel ; tour antigel ; vignoble de Quincy ; réseau de capteurs sans fil ; simulations numériques*

Summary: ***Microscale numerical simulations and field measurements of the climate during a spring frost event in a vineyard equipped with anti-freeze towers.*** *Spring frosts are especially devastating for vine crops. One method used to protect vineyard is to resort to wind machines. However, some weaknesses currently still remain on the effect of the machine on its environment and the implementation and servitude of its operation according to frost local forecast. In order to face this concern, the agricultural cooperative of Quincy has associated with partners to develop the SICTAG Project. The aim of this project is to initiate an approach to automatize the management of the wind machines farm. Wireless sensors networks will be implemented in the vineyard and numerical simulations (WRF and OpenFOAM) will be run to characterize and assess the wind machine's operation, alone or in synergy, and to design predictive models of frost occurrence at local micro scale. The point here is to control the individual operation of the wind machines to field measurements to protect the plot against the frost, in an efficient way and at reduced energy costs.*

Key words: *frost; wind machine; Quincy vineyard; wireless sensors networks; numerical simulations*

Introduction

Dans le secteur agricole, le gel de printemps est responsable de pertes économiques importantes. Ces gelées printanières récurrentes, même pour différents scénarios du réchauffement climatique, sont hostiles au développement biologique et détruisent bon nombre de bourgeons, affectant ainsi la future récolte. Ces gelées surviennent en effet à un stade où la plante est en éveil, et donc vulnérable, ce qui cause la destruction partielle ou totale de ses bourgeons, entraînant une perte importante de production et de ressources économiques (Fraser *et al*.,2009).

Pour lutter contre ce phénomène climatique naturel, différentes méthodes ont été développées et peuvent être réparties en deux catégories (Kalma *et al*., 1992 ; Snyder and de Melo-Abreu, 2005) : (1) des moyens de lutte passifs (choix de variétés plus robustes, orientation de la parcelle, traitement chimique, travail du sol, …) ; (2) des moyens de lutte actifs (aspersion, chauffage, tour antigel, hélicoptère, bougies, ...). Cette terminologie est similaire aux contrôles passifs et actifs du domaine de la commande des écoulements de fluide. Dans le cas d'un parc de tour antigel, il s'agit d'un contrôle actif en boucle fermée. La tour antigel est un actionneur dont le fonctionnement est asservi à des données (mesures de terrain et prévisions météorologiques) ou à la décision du responsable du déclanchement des moyens de lutte, de

sorte à maintenir hors gel la couche d'air dans laquelle baigne le vignoble, à moindre coût environnemental (dépense énergétique, pollution, nuisance sonore).

Dans le vignoble de Quincy, les viticulteurs se sont mobilisés et ont investi dans un parc de tours antigel comptant aujourd'hui 55 unités et couvrant la majorité de leur culture. Le projet SICTAG pour « *Système Innovant d'aide à la décision Connectée et de gestion efficiente en temps réel des Tours Antigel du Centre-Val de Loi*re » est un Projet Européen Innovant (PEI) dont la finalité est de donner des moyens aux agriculteurs d'automatiser le fonctionnement des tours antigel en synergie de manière efficiente (Méré *et al*., 2020). Plusieurs sujets ont été identifiés et seront abordés dans le cadre de ce projet : **(1) la sectorisation et la prévision du risque gélif à court terme pour déclencher la lutte à bon escient**. Pour aborder ce sujet, nous nous appuierons sur un réseau de capteurs sans fil installé sur le vignoble et sur des simulations numériques type downscaling météo de la méso-échelle (WRF) à la micro-échelle (OpenFOAM) ; **(2) le fonctionnement des tours seules et en synergie.** Pour des configurations topographiques différentes et des situations climatiques variées, nous caractériserons l'écoulement généré par la tour grâce à un réseau de capteurs dédiés. Ces mesures permettront également d'identifier un modèle décrivant l'effet de la tour sur son environnement. Ce modèle sera implémenté dans le solveur OpenFOAM pour extrapoler la performance des tours en dehors de son fonctionnement nominal et de la situation topographique et climatique propre au terroir de Quincy ; **(3) l'automatisation du parc**. Nous utiliserons le solveur OpenFOAM à la micro-échelle du terroir complétée par la modélisation du parc de tours antigel pour évaluer l'efficacité de différentes implantations de tours et de capteurs de monitoring et de différentes stratégies de pilotage pour le rejet des effets néfastes des évènements gélifs.

Dans ce papier, la section 1 et la section 2 décrivent les différents types de gel de printemps, et le principe de fonctionnement d'une tour antigel. La section 3 présente le site d'expérimentation (le terroir de Quincy). Les sections 4 et 5 détaillent les réseaux de capteurs qui seront installés sur ce site et les simulations numériques qui seront effectuées. La section 6 donne un aperçu des résultats et de l'analyse qui pourront être présentés, principalement ici sur la caractérisation de l'écoulement généré par les tours.

1. Gel de printemps

On distingue principalement deux types de gels différents (Kalma *et al*., 1992) : (1) La gelée advective, ou gelée noire, correspond à une masse importante d'air froid ($T<0°C$) venue du Nord transportée par des vents modérés à forts. Elle sévit plus particulièrement sur les plateaux situés aux hautes altitudes et il n'existe à ce jour aucun moyen de lutte efficace pour la contrer ; (2) La gelée radiative, ou gelée blanche, est un phénomène nocturne qui apparaît sous des conditions atmosphériques calmes et claires (vent nul à faible et ciel dégagé). La nuit, le sol se refroidit en restituant la chaleur de la journée par réémission du rayonnement solaire, plus ou moins fortement selon son émissivité et les couches d'air proches du sol se refroidissent par conduction. Un gradient de température positif communément appelé couche d'inversion se met ainsi en place. De plus, si le ciel est dégagé, aucun nuage ne retient le rayonnement et celui-ci est alors dispersé dans les plus hautes couches de l'atmosphère. Le gel apparaît lorsque la température de l'air passe en dessous de la température de rosée. L'humidité de l'air se condense alors en glace et recouvre les plantes, d'où son nom de gelée blanche. A plus petite échelle, le changement d'état de la matière est accompagné d'une variation de l'enthalpie par conversion de la chaleur latente contenue dans l'humidité en chaleur sensible. La tour antigel a été pensée pour cette situation climatique, pour laquelle un brassage de l'air sur une hauteur suffisante permet de casser cette stratification. On peut simplement modéliser la formation de gel lors d'une gelée radiative en effectuant le bilan des transferts d'énergie (en $W.m^2$) à la surface sol/atmosphère (Snyder et de Melo Abreu, 2005)

$$R_{Sd} + R_{Su} + R_{Ld} + R_{Lu} = G + H + LE$$

R_{Sd} et R_{Su} les flux d'énergie par radiation de courtes longueurs d'onde reçues (le soleil la journée, signe positif) et émises (le jour et la nuit, signe négatif) ;

R_{Ld} et R_{Lu} les flux d'énergie par radiation de grandes longueurs d'onde reçues et émises ;

G la densité de flux de chaleur dans le sol ;

H la densité de flux de chaleur sensible ;

L la chaleur latente de vaporisation d'eau ;

E la densité de flux des molécules contenues dans l'air.

Durant une nuit de gel, le bilan radiatif (à gauche) se traduit par un flux d'énergie qui s'échappe du sol (G), une baisse de la température (H) et un dépôt de gel par condensation de l'humidité de l'air (LE). On peut établir un bilan équivalent pour l'interaction plante/atmosphère. Le passage d'un état de la matière où les molécules ont une certaine liberté dans leurs liaisons (ici le gaz) à un état plus contraint (la glace) est exothermique, le processus libère alors de la chaleur dans l'environnement proche de la matière. Cette réaction est toutefois trop éphémère et légère pour considérer un réchauffement pérenne de la plante.

2. Fonctionnement de la tour antigel

Le modèle classique d'une tour antigel est un ventilateur axial situé au sommet d'un mât (Yazdanpanah, 2011 ; Hu *et al*., 2018). Le ventilateur est généralement constitué d'un moyeu quasi-horizontal, inclinable de quelques degrés vers le bas, pour orienter le jet de sorte à ce qu'il balaye les cultures d'un flux d'air. Le moyeu est équipé de deux pâles et est en rotation autour du mât, pour augmenter la surface couverte. Typiquement, la hauteur du mât est de 10m, l'envergure des pâles est de 5-6m et tourne à une fréquence d'environ 500rpm, l'inclinaison du moyeu est de -7 degré et la période de rotation est de quelques minutes (Fraser *et al*., 2009). Les ventilateurs généralement utilisés ont une poussée telle qu'ils ont une portée d'environ 100m, permettant ainsi de couvrir quelques hectares de terrain. A noter que depuis peu sont commercialisées des tours mobiles moins hautes et équipées d'un ventilateur axial à 5 pâles de 2m d'envergure.

Le principe de fonctionnement d'une tour antigel repose en premier lieu sur la présence d'une stratification thermique qui s'établie lors de conditions climatiques conduisant à une inversion de température. La tour antigel est particulièrement efficace pour une gelée radiative avec à minima entre 1.5°C et 2°C d'inversion thermique entre 1.5 et 15m de hauteur (Kalma *et al.*, 1992) et par vent faible avec un maximum à 2.5m. s^{-1}, au-delà un risque d'endommagement des pâles est présent (Snyder et de Melo Abreu, 2005). Le ventilateur balaye la parcelle cultivée avec un air chaud, de quelques degrés au-dessus de 0, prélevé en altitude. Cet air chaud se mélange rapidement avec l'air froid (quelques degrés au-dessous de 0) au niveau du sol, du fait de la turbulence générée par le jet et de son interaction avec le sol. La stratification thermique est momentanément supprimée L'air présente alors une température relativement homogène et légèrement positive. Le risque gélif est écarté si la période de rotation du ventilateur est plus petite que le temps caractéristique de la restratification. Il est à noter que plusieurs tours sont généralement nécessaires pour protéger des cultures parfois étendues, et fonctionnent en « synergie » pour accroître l'efficacité de ce moyen de lutte (Snyder et de Melo Abreu, 2005). Aussi, les tours peuvent être associées à un système de chauffage positionné au pied du mât. L'air chaud produit monte par gravité et est capté à l'aspiration du ventilateur axial pour participer à l'élévation de température au niveau de la vigne.

3. Site d'expérimentation

Le vignoble de Quincy s'étend sur une zone délimitée de 700 hectares dans la région viticole du Centre Loire. Il est bordé par de grandes forêts situées au nord et à l'ouest, et la rivière du Cher à l'est. Il repose sur des terroirs de graves sableuses et/ou argileuses déposées en terrasses alluviales anciennes, perchées sur des coteaux de calcaire lacustre. Ce terroir constitue un plateau qui s'incline vers l'est en pente douce vers le Cher et offre ainsi une ouverture aux vents de Nord-Est. Ce plateau est entaillé de petits vallons qui constituent autant d'entrées froides.

Le vignoble de Quincy possède 23 tours stationnaires non chauffées et 32 tours stationnaires chauffées au pied du mât par un brûleur. La figure 1 illustre une parcelle de vigne dans un vallon du vignoble de Quincy, équipée de tours antigel fonctionnant en synergie. La tour chauffée (à droite sur la photo) mesure 10.5m de hauteur et l'envergure de ses pâles est de 5.4m. Les tours non chauffées qu'on aperçoit au loin sur la photo font environ 10m de hauteur et ont une envergure de pâle de 6.04m.



Figure 1. Photo des tours antigel implantées dans le vignoble de Quincy

4. Réseaux de capteurs

Des campagnes de mesures seront menées pendant la durée du projet (2020-2022), principalement, au printemps et à l'automne et sur l'ensemble du territoire. Elles permettront notamment d'acquérir des données locales sur la température, l'hygrométrie, et la vitesse du vent et seront menées à deux échelles de temps différentes, l'une liée au temps caractéristique météorologique à l'échelle du vignoble, l'autre liée au temps caractéristique de la tour antigel.

La mesure de la météorologie locale sera effectuée à l'aide d'un réseau de capteurs sans fil spécifique destiné à la prévision du risque gélif. Il sera constitué de plusieurs stations météo et de capteurs reliés à une application afin de suivre l'évolution de la météo en temps réel. La fréquence d'acquisition sera de l'ordre du 1/4h et le monitoring sera maintenu durant la saison, voire s'étendra sur la durée totale du projet.

L'aéraulique générée par les différentes tours antigel sera mesurée via un deuxième réseau de capteurs dédiés. Nous souhaitons obtenir des cartographies de température de l'air et de quantités cinétiques de l'écoulement (vitesse et agitation turbulente) autour des tours. Ces mesures permettront d'analyser le comportement du jet dans différentes situations topographiques et météorologiques. Pour ce faire, une quarantaine de points de mesure seront distribués autour de la tour à caractériser. En chaque point de mesure, un mât de 1.5m supportera un anémomètre et un thermomètre en son sommet (au-dessus de la vigne), et un second thermomètre et un hygromètre en son milieu (à mi-hauteur de la vigne). Le temps de réponse (et le pas de temps d'acquisition) de l'anémomètre et des deux thermomètres doit être inférieur à la seconde pour estimer la forme (probablement en spirale) de l'axe du jet généré par la tour et le temps de restratification de l'air après le passage du jet et après l'arrêt de tour. Ces mesures seront complétées par la mesure de profils de stratification thermique sur une hauteur de 20m, avec idéalement le profil de couche limite en vitesse.

5. Simulations numériques

Des simulations aux micro-échelles météorologiques seront réalisées avec prise en compte de simulations méso-échelles (WRF et Arome) et des mesures de terrain issues principalement d'un réseau de capteurs sans fil décrit section 4 pour guider et alimenter les conditions initiales et aux bords. Ces simulations permettront : **(1)** de cartographier le risque de gel sur le territoire pour différentes situations météorologiques ; **(2)** d'optimiser la couverture du réseau de stations météo pour une meilleure prévision du risque gélif ; **(3)** de proposer une implantation à priori du parc de tours fixes et de le compléter par des tours mobiles.

Le modèle ARW-WRF a déjà été évalué dans sa capacité à reproduire les variations spatiales et temporelles de procédés atmosphériques avec une résolution de 500m dans des vignobles sud-africains (Soltanzadeh *et al*., 2017). Des simulations de l'écoulement généré par les tours antigel seront réalisées en s'appuyant sur une modélisation de type Blade Element Momentum BEM (Lanzafame *et al.,* 2007) à valider par comparaison avec les mesures de terrain et des mesures sur maquettes à échelle réduite en environnement maîtrisé. Plusieurs simulations sont nécessaires à différentes échelles de temps (relative à la pâle, à la rotation et à la production de gel). Ces simulations permettront d'étendre la compréhension du fonctionnement des tours au-delà de leur mode de fonctionnement nominal et pour des situations topographiques et climatiques différentes de celles de Quincy. A terme, en appliquant un downscaling méso-échelle WRF vers micro échelle OpenFOAM, les deux modèles seront couplés afin de simuler le fonctionnement des tours dans l'environnement du vignoble et sous climat local, permettant de modéliser au mieux la prédiction du risque gélif à l'échelle du terroir. La technique d'assimilation de données permet de préciser les conditions initiales et aux limites dans le solveur micro-échelle (Defforge *et al*., 2019). Toutefois, il n'est à ce jour pas prévu dans le projet d'appliquer cette technique pour la restitution de l'écoulement.

6. Quelques éléments d'analyse

L'efficacité de la tour varie en fonction de l'intensité de l'inversion thermique et de la topographie du terrain. On peut ainsi mettre en évidence l'influence de la stratification en mesurant l'effet de la tour sur une même parcelle pour deux nuits de gel à l'intensité différente. L'influence de la topographie sur le rendement de la tour peut être quant à elle caractérisée en menant des mesures durant une même nuit sur deux parcelles de configurations géographiques différentes. On peut ainsi mesurer l'influence horizontale et verticale de la tour antigel sur le réchauffement de l'air en traçant le profil de la température suivant l'altitude (Fig.2) ou en traçant les isothermes à proximité de la tour (Fig.3). Par ailleurs, la vitesse du flux d'air généré par la tour dépend de multiples facteurs comme la conception des pâles, la vitesse de rotation, la puissance du rotor, le temps de révolution et les conditions environnantes (Beyà-Marshall *et al*., 2019 ; Yongguang *et al*., 2016). De plus, la stratification nocturne joue un rôle important dans l'écoulement, impliquant une variation de la densité de l'air suivant sa température et son hygrométrie en fonction l'altitude. Le vent extérieur peut lui aussi freiner ou augmenter la portée du jet suivant sa direction (Ribeiro *et al*., 2006). La figure 3 met ainsi en évidence l'effet du vent sur la portée du jet à travers la parcelle. On remarque la forme elliptique des isothermes qui traduit l'étirement de l'action de la tour sous celle du vent.

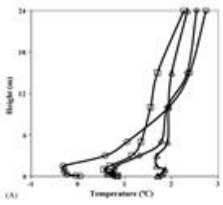


Figure 2. Profil de température mesuré à 30m de la tour avant opération (○) et 1min (◇), 3min (□) et 5min (△) après démarrage (Ribeiro *et al*., 2006)

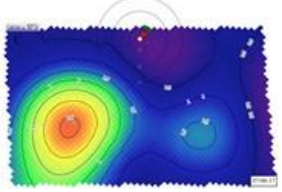


Figure 3. Isothermes de température à proximité de la tour (Beyà-Marshall *et al*., 2019)

Conclusion

Pour faire front contre les dégâts du gel, les viticulteurs de Quincy ont, au fil des années, modifiés leurs pratiques. Ils se sont unis pour équiper leur terroir d'un parc conséquent de tours antigel. Il se sont également mobilisés pour associer différents partenaires (viticulteurs, entreprises innovantes et centre de recherche) dans le projet SICTAG, avec pour objectif de comprendre et optimiser ce moyen de lutte. Ainsi, durant ce projet, des mesures de terrain et des simulations numériques de différentes envergures mais complémentaires seront réalisées. Elles doivent notamment permettre de répondre aux questions en suspens et aux attentes des viticulteurs comme la caractérisation du fonctionnement d'une tour antigel, la prédiction et la cartographie à l'échelle du terroir du risque de gel, la capacité du parc de tours à rejeter le risque gélif, en travaillant seules et en synergie, et la mise en place de l'automatisation du parc.

Bibliographie

Beyá-Marshall V., Herrera J., Santibáñez F., & Fichet T., 2019. Microclimate modification under the effect of stationary and portable wind machines. *Agricultural and forest meteorology*, 269, 351-363.

Defforge C. L., Carissimo B., Bocquet M., Bresson R., & Armand P., 2019. Improving CFD atmospheric simulations at local scale for wind resource assessment using the iterative ensemble Kalman smoother. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 189, 243-257.

Fraser H., Silngerland K., Ker K., Fisher H., & Brewster R., 2008. Wind machines for minimizing cold injury. InfoSheet Ontario Ministry of Agriculture. Food and Rural Affairs.

Hu Y., Asante E. A., Lu Y., Mahmood A., Buttar N. A., & Yuan S., 2018. Review of air disturbance technology for plant frost protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 21-28.

Kalma J.D., Laughlin G.P., Caprio J.M., & Hamer P. J. C., 1992. The Bioclimatology of Frost: Its Occurrence, Impact and Protection, volume 2. Springer Berlin Heidelberg.

Lanzafame R., & Messina M., 2007. Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEM theory. *Renewable energy*, 32(14), 2291-2305.

Méré J.F., Buisson E., Carlier J., Delannoue G., Mesnil P.C., Rabin C., Guérin L. & Lepennetier A., 2020. SICTAG'Mag.

Ribeiro A.C., De Melo-Abreu J.P., & Snyder R.L., 2006. Apple orchard frost protection with wind machine operation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2-4), 71-81.

Snyder R. L. & Paulo de Melo-Abreu J., 2005. Frost protection: fundamentals, practice and economics. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Soltanzadeh I., Bonnardot V., Sturman A., Quénol H., & Zawar-Reza P., 2017. Assessment of the ARW-WRF model over complex terrain: the case of the Stellenbosch Wine of Origin district of South Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4), 1407-1427.

Yazdanpanah H., & Stigter C. J., 2011. Selective inverted sink efficiency for spring frost protection in almond orchards northwest of Isfahan, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(1-2), 27-35.

Yongguang H., Ping L., Amoah A. E., Wenye W., & Pingping L., 2016. Control system of a performance test-bed for frost protection wind machines. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(6), 36-43.