



HAL
open science

Gelées tardives et viticulture en basse et moyenne vallée de la Loire (France)

Olivier Cantat, Olivier Planchon, Hervé Quénol, Edwige Savouret, Benjamin Bois, François Beauvais, Sophie Brunel-Muguet

► To cite this version:

Olivier Cantat, Olivier Planchon, Hervé Quénol, Edwige Savouret, Benjamin Bois, et al.. Gelées tardives et viticulture en basse et moyenne vallée de la Loire (France). *Climatologie*, 2019, 16, pp.91-128. 10.4267/climatologie.1413 . hal-02446931

HAL Id: hal-02446931

<https://normandie-univ.hal.science/hal-02446931v1>

Submitted on 12 Nov 2020

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.

GELÉES TARDIVES ET VITICULTURE EN BASSE ET MOYENNE VALLÉE DE LA LOIRE (FRANCE) Approche géoclimatique d'un aléa météorologique majeur pour la vigne

Olivier CANTAT ¹, Olivier PLANCHON ², Hervé QUÉNOL ³, Edwige SAVOURET ⁴,
Benjamin BOIS ⁵, François BEAUVAIS ¹, Sophie BRUNEL-MUGUET ⁶

¹ Normandie Université, UNICAEN, CNRS, LETG
14000 Caen, France
olivier.cantat@unicaen.fr

² Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, Université Bourgogne-Franche-Comté
21000 Dijon, France

³ Université de Rennes 2, CNRS, LETG
35000 Rennes, France

⁴ Université de Lorraine, laboratoire LOTERR
57000 Metz, France

⁵ Institut Universitaire de la Vigne et du Vin
21000 Dijon, France

⁶ Normandie Université, UNICAEN, INRA, EVA
14000 Caen, France

Résumé

Dès que la situation météorologique est propice à l'établissement d'un temps clair et calme, des contrastes thermiques importants apparaissent de nuit au gré de facteurs locaux comme la topographie et la nature des sols. Si l'on croise ces composantes atmosphériques et géographiques avec la phénologie de la vigne, le printemps s'avère être une période particulièrement surveillée en raison de l'occurrence possible de gelées pouvant hypothéquer le développement du végétal et, par conséquent, pénaliser la production de raisins impactant les filières maraîchères et viticoles. Ce fut notamment le cas en France et dans certains pays voisins fin avril 2016, avec localement des gelées sous abri fortes (inférieures à -5°C) et durables (plusieurs heures consécutives). Le phénomène s'est également produit en 2017 et 2019. Pour illustrer les combinaisons de situations météorologiques et de phénomènes topo-climatiques à risques gélifs chez la vigne, l'étude de cas porte sur la basse et moyenne vallée de la Loire, région viticole française objet du programme européen *LIFE-ADVICLIM (ADaptation of VIticulture to CLIMate change : High resolution observations of adaptation scenarii)*. Après avoir présenté le cadre climatique général du secteur d'étude, le contexte météorologique d'échelle synoptique et la particularité des gelées tardives par rapport à celles de pleine saison hivernale, l'article analyse la géographie à échelle fine de l'événement gélif du 27 avril 2016 entre Nantes et Orléans. Un zoom sur deux stations voisines représentatives de contextes géographiques différents (Romorantin à la topographie en creux sur sol sableux et Lye sur une colline dégagée) permet ensuite de montrer comment les jeux d'échelles spatio-temporelles mènent à une répartition thermique tout en contrastes, entre l'échelle synoptique (pour définir un potentiel de gelée tardive) et locale (pour en voir l'expression effective sur le terrain, en intensité comme en durée).

Mots-clés : gelées tardives, types de circulation atmosphérique, types de temps, topo-climatologie, viticulture, vallée de la Loire.

Abstract

**LATE FROSTS AND VITICULTURE IN THE LOWER AND MIDDLE LOIRE VALLEY (FRANCE).
A geoclimatic approach to a major meteorological hazard for viticulture**

Night-time clear and calm weather conditions cause a highly contrasting fine-scale spatial temperature distribution, locally depending on topographic features, type of soil and land cover. The combination of meteorological and geographical features with plant phenology points out the strong sensitivity of spring

phenology to the occurrence of late frosts. Spring frosts can have serious impacts on plant growth and can penalize economic sectors depending on fruit and wine production. Therefore, spring is the most monitored season. Strong frosts occurred in France in late April 2016, causing local and long-lasting (several consecutive hours) temperature records below -5°C in some lowland places. The same features occurred in spring 2017 and 2019. The study of the combined meteorological and topoclimatic features causing the spring frosts of 2016 in France was carried out in the lower and middle Loire Valley. This part of the Loire valley is one of the studied wine regions of the European project LIFE-ADVCLIM (ADaptation of VIticulture to CLIMate change: High resolution observations of adaptation scenarii). In this study, the following points are developed: the climate conditions in the geographical context of the lower and middle Loire Basin; the synoptic scale meteorology associated with late frosts and the peculiarity of spring frost compared to winter frost. The cold event of 27 April 2016 between Nantes and Orléans is analysed using a methodology that takes into account geography at fine scales. A comparative study is carried out between two nearby weather stations, representative of different local-scale geographical contexts: Romorantin, located on a valley floor with a sandy soil, and Lye, located on an open hilltop. The results show how the nested space-time scales must be taken into account to explain the contrasting temperature distribution: the synoptic scale allows frost risk triggering, while at local scale their effective impacts on the studied site to be highlighted, in terms of intensity and duration of the frost event.

Key-words: *spring frosts, atmospheric circulation patterns, weather types, topoclimatology, vineyards, Loire Valley, France.*

Introduction

Dans les régions des latitudes moyennes, le printemps marque l'arrivée des conditions environnementales nécessaires au redémarrage et à la croissance des plantes. Cette dynamique végétale dépend à la fois d'éléments constants et récurrents, comme le photopériodisme (allongement de la durée du jour), et d'éléments variables d'une année à l'autre, comme les conditions climatiques en cours et celles des mois précédents (principalement la température de l'air), déterminant l'avancement ou le retard des stades phénologiques propres à chaque espèce, comme la feuillaison, la floraison et la fructification (Estrella *et al.*, 2007 ; Bloesch et Viret, 2008 ; Polgar et Primack, 2011). Avec cette variabilité interannuelle du climat, le développement de la plante est sous la menace de gelées tardives, épisodes certes courts mais pouvant remettre en cause la succession des différentes étapes menant *in fine* à la production de fruits lors de la « belle saison ».

Avec le réchauffement contemporain, les plantes bénéficient de plus de chaleur et plus tôt, ce qui occasionne une avancée de leur cycle phénologique (Estrella *et al.*, 2007 ; IPCC, 2013 ; *Indice du printemps* de Météo-Suisse). Ce changement climatique observable depuis le milieu des années 1980 (Schultz, 2000 ; Hansen *et al.*, 2010 ; Jones *et al.*, 2012 ; Reid *et al.*, 2016) n'exclut pas l'existence d'épisodes froids marqués en hiver et plus en avant dans la saison. Ainsi, au printemps, les plantes sont confrontées à un double effet antagoniste : d'une part, une évolution des températures favorable (moins de froid) et, d'autre part, des risques d'être touchées par le gel accru par augmentation de leur sensibilité (avancement de la saison végétative : Hänninen, 1991 ; Scheifinger *et al.*, 2002 ; Gu *et al.*, 2008 ; Sadras *et al.*, 2009 ; Martin *et al.*, 2010 ; Hufkens *et al.*, 2012 ; Augspurger, 2013 ; Morin et Chuine, 2014 ; Bigler et Bugmann, 2018 ; Liu *et al.*, 2018 ; Vitasse *et al.*, 2018 ; sur la vigne : Briche *et al.*, 2011 ; Mosedale *et al.*, 2015 ; Sgubin *et al.*, 2018 ; Chamberlain *et al.*, 2019 ; Gavrilesco *et al.*, 2019). En conséquence, au croisement de l'aléa météorologique et de la vulnérabilité d'origine phénologique, et ce malgré un contexte globalement plus chaud, les risques de pertes de production pour l'agriculture, l'arboriculture et la viticulture sont toujours présents, et parfois même plus sévères qu'autrefois pour une intensité de gel identique car les plantes sont moins acclimatées au froid (Castel *et al.*, 2017) ou débourent plus tôt (Sgubin *et al.*, 2018).

Pour illustrer ces risques, l'étude porte sur l'évolution et la géographie des gelées printanières en basse et moyenne vallée de la Loire et leurs conséquences sur la vigne. Car au-

delà des représentations bienveillantes associées à cette région – dont les origines remonteraient au 16^{ème} siècle avec les sonnets de Joachim du Bellay sur la « douceur angevine » – comme toute région des latitudes moyennes océaniques, le Val de Loire peut connaître des épisodes froids tardifs. A titre d'exemple, ces vignobles ont été touchés par le gel en avril à trois reprises au cours des quatre dernières années (2016, 2017, 2019), avec des pertes variables, de 20 à 80 %, en fonction du caractère plus ou moins gélif des secteurs et des parcelles. Ce constat faisait titrer au magazine en ligne professionnel *Vitisphère* : « le gel, comme une mauvaise habitude en Loire » (Proust et Touchais, 2019).

Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux abordant l'analyse et la modélisation spatiale du climat à l'échelle des vignobles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique (Bonnefoy *et al.*, 2010 ; Bonnefoy *et al.*, 2012 ; Bonnefoy *et al.*, 2014 ; Quénot *et al.*, 2014 ; Quénot et Bonnardot, 2014).

1. Présentation du secteur d'étude, de ses caractères climatiques et des enjeux résultants pour la viticulture

1.1. Principaux caractères géographiques et choix des stations représentatives

Le secteur d'étude correspond à la basse et moyenne vallée de la Loire, plus long fleuve français qui traverse sur plus de 1000 km la partie centrale du pays, depuis sa source en Ardèche située à plus de 1400 mètres d'altitude au Mont Gerbier-de-Jonc (Massif Central), jusqu'à son embouchure en Loire-Atlantique où il se jette dans l'océan au niveau de Saint-Nazaire en rive nord et de Saint-Brévin-les-Pins en rive sud. L'analyse se focalise sur la partie du cours d'eau en aval d'Orléans, où le fleuve prend une orientation générale est-ouest et où apparaissent les vignobles les plus étendus du Val de Loire¹, avec successivement d'amont en aval les vins de l'Orléanais, de Touraine, du Saumurois, de l'Anjou et du Pays Nantais. L'aire étudiée se présente sous la forme d'un couloir légèrement ondulant, étiré d'est en ouest sur environ 300 km de longueur et 50 km de largeur (figure 1).

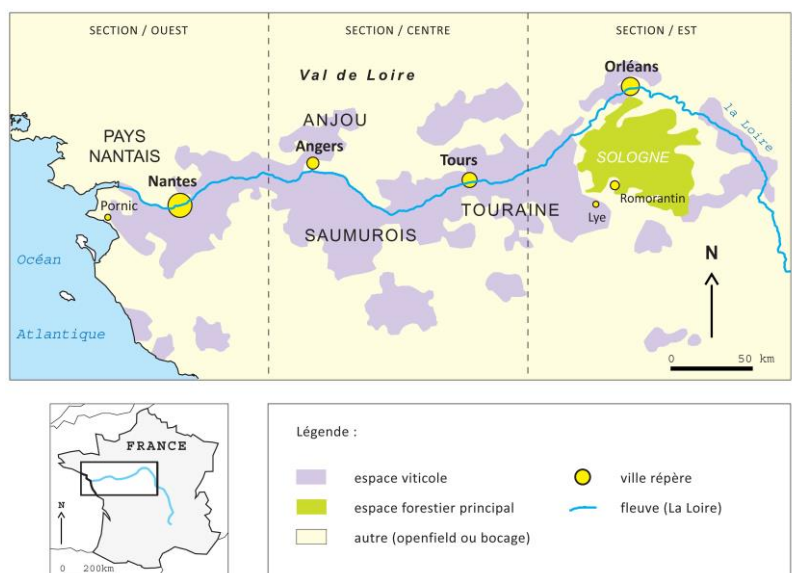


Figure 1 : Cadre géographique de l'aire d'étude, localisation des secteurs de culture de la vigne et des villes associées aux postes climatiques de référence de l'étude (d'après données cartographiques IGN). *Geographical setting of the study area, including the location of the vine growing areas and cities associated with the reference weather stations (according to IGN cartographic data).*

¹ Le Val de Loire constitue lui-même la troisième région viticole de France par son étendue (InterLoire, 2011).

De par sa position géographique à l'extrémité occidentale de l'Europe, le climat est sous la dépendance des influences océaniques portées par les flux d'ouest dominants des latitudes moyennes (Pédelaborde, 1958). Plus précisément, le climat ligérien s'insère à l'ouest du vaste domaine tempéré océanique sans saison sèche, à hivers frais et étés doux, qui couvre la plus grande partie de l'Europe occidentale et centrale (catégorie *Cfb* de la classification de Köppen – 1900). A l'échelle subrégionale, on observe cependant une dégradation progressive mais nette des marqueurs du climat océanique en remontant le cours de la Loire vers l'est (Planchon, 1994 et 1997). Ce changement longitudinal se matérialise par des limites climatiques secondaires aux positions plus ou moins fluctuantes dans les diverses classifications. Ainsi, d'après le zonage de *l'Atlas climatique de la France* (Météo-France, 1986), le secteur d'étude serait divisé à hauteur du Saumurois en deux entités d'égale étendue, avec à l'ouest le type *océanique* et à l'est, le type *océanique dégradé*. Pour d'autres auteurs, cette césure spatiale est reportée plus à l'ouest, entre Nantes et Angers (CRC, 1985 ; Choissnel et Payen, 1988). Les géographes climatologues ont proposé des découpages encore plus fins (Vigneau, 1997, 2005). Par le croisement de divers paramètres climatiques et l'expertise spatiale *via* les outils géomatiques, des chercheurs ont pu représenter plus précisément les particularités du climat. Dans leur typologie des climats en France, Joly *et al.* (2010) distinguent trois entités sur le secteur d'étude considéré : *océanique franc* à l'ouest, *océanique altéré* au centre et *océanique dégradé* à l'est.

Dans le prolongement de ces derniers travaux, pour caractériser globalement le comportement météo-climatique intra régional, cette portion de la Loire a été subdivisée en trois sections d'environ 120 km de large, comportant chacune une ou deux stations de référence : 1) la section occidentale avec Pornic et Nantes-Bouguenais, 2) la section centrale avec Angers-Beaucouzé et Tours et 3) la section orientale avec Orléans. La sélection a tenu compte des exigences météorologiques usuelles (Leroy et Lafaysse, 1993) : la qualité instrumentale et la représentativité géographique des observations ont été validées par l'analyse des métadonnées accessibles sur le site de Météo-France². Le choix a également été déterminé par la disponibilité de longues séries de mesures pour une étude des changements climatiques depuis les années 1950. Pour éviter les effets liés à la topographie locale et/ou à la présence d'obstacles naturels ou artificiels qui interviennent dans les processus d'échelle fine (Escourrou, 1981 ; Carrega, 2003), les stations sont toutes positionnées sur des espaces plans et dégagés correspondant aux normes internationales d'observation météorologique (Leroy, 1999). Toutefois, celle de Pornic ne remplit pas totalement l'ensemble de ces critères car pour être représentative au plus près du domaine côtier, elle est située sur le site du phare, espace pavillonnaire à l'interface océan/continent³.

1.2. Caractérisation de la dégradation du climat océanique d'ouest en est

Les modifications du climat tempéré océanique transparaissent dans les diagrammes ombrothermiques établis sur la période de référence actuelle 1981-2010 (figure 2). Le trait le plus marquant apparaît dans le régime pluviométrique : le maximum franc d'automne et d'hiver près du littoral (80 à 100 mm par mois entre octobre et janvier à Pornic et Nantes) s'atténue rapidement dans les terres pour, à l'est, donner un diagramme quasiment plat au contact du bassin parisien (autour de 50 à 60 mm tout au long de l'année à Orléans). Le total annuel s'en trouve modifié, avec une répartition classique en domaine océanique (Escourrou, 1978). Ce cumul se décrit sous la forme d'un apport maximum à quelques kilomètres dans les terres (de

² Publiothèque Météo-France, onglet « Tout sur les stations météo » : <http://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp?idRubrique=clim>

³ Station fermée en janvier 2010, très légèrement déplacée à *la Fontaine aux bretons* jusqu'en janvier 2013, puis remplacée par le poste actuel de *Remartin*, situé dans les terres à environ 4 km au nord-est, donc moins représentatif du climat côtier *stricto sensu*.

738 à 820 mm entre Pornic et Nantes), puis d'une réduction rapide dès l'Anjou où les valeurs deviennent inférieures à 700 mm (693 mm à Angers), voire 650 mm plus à l'est (643 mm à Orléans), faisant ainsi de ce secteur une des régions françaises à climat tempéré les moins arrosées, rattachée à l'entité sèche du centre du bassin parisien (Pédelaborde, 1958).

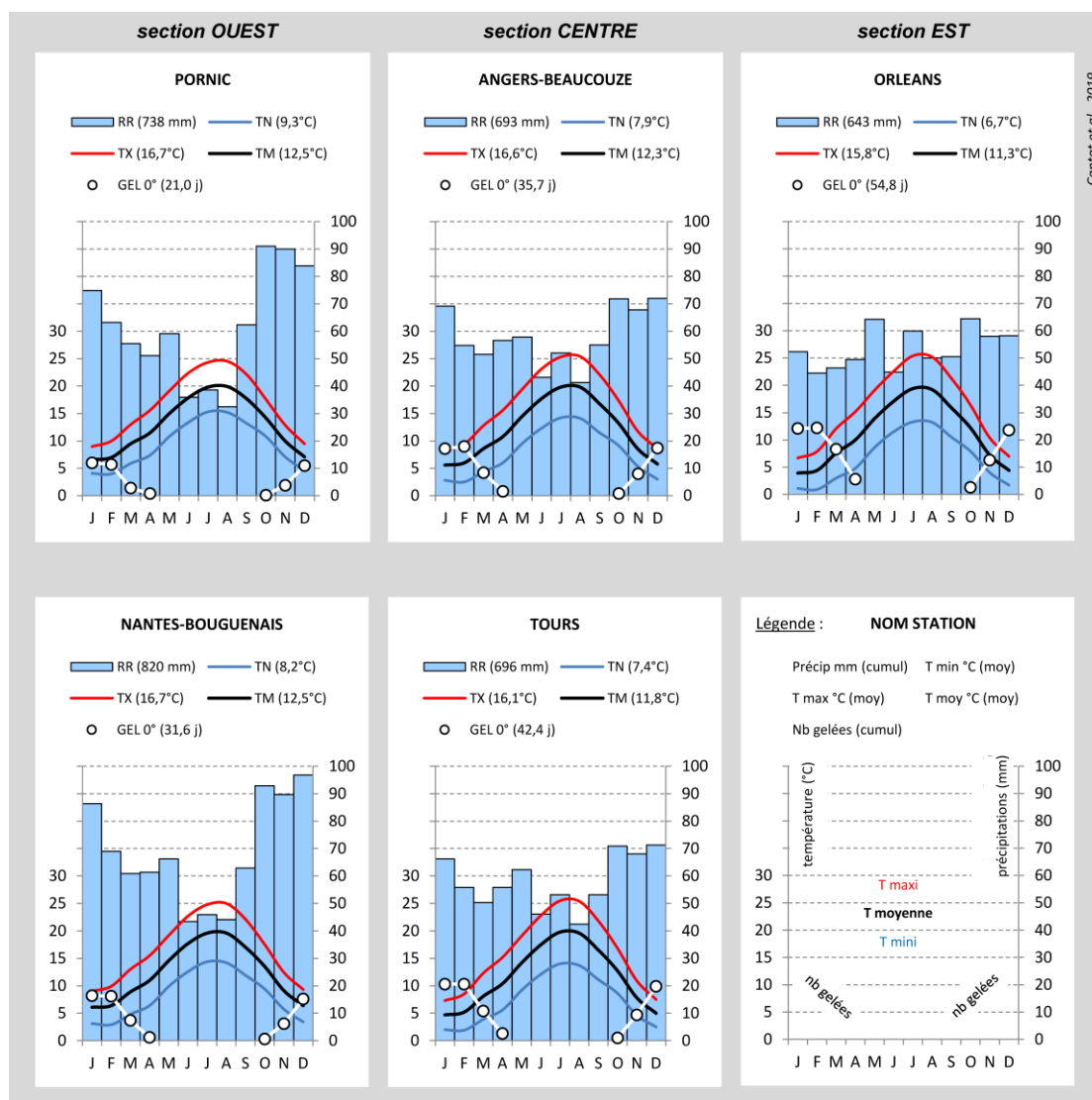


Figure 2 : Diagrammes ombrothermiques et nombre de jours de gelées sur la Normale climatique 1981-2010 le long de la basse et de la moyenne vallée de la Loire (d'après données Météo-France). *Ombrothermal diagrams and number of days of frost over the climate normal period 1981-2010 along the lower and middle Loire Valley (according to Météo-France data).*

Les fréquentes incursions des perturbations atlantiques sont aussi synonymes d'un apport de douceur (air océanique). Cette influence est particulièrement visible sur les températures minimales (moyenne annuelle entre 9,3°C à l'ouest et 6,7°C à l'est) et a des conséquences marquées en saison hivernale avec l'apparition d'un gradient spatial important dans la fréquence des gelées, entre le littoral (une vingtaine d'occurrences à Pornic) et l'amont du secteur d'étude (plus d'une cinquantaine de jours à Orléans).

Les fortes gelées (minimum inférieur à -5°C) sont rares (1 à 5 jours par an) et uniquement concentrées sur les mois les plus froids de l'année, entre décembre et février. Toutefois, la partie la plus orientale du secteur d'étude se démarque nettement avec près de 10 occurrences par an car elle est au contact des nuances plus continentales du bassin parisien, influencées par

l'intrusion temporaire de masses d'air plus froides et sèches en provenance de l'Europe centrale et/ou de la Scandinavie à cette saison (plus forte variabilité interannuelle des masses d'air propre à l'est de la France) (Joly *et al.*, 2010).

Les très fortes gelées (minimum inférieur à -10°C) sont quasiment inexistantes : 1 fois tous les 10 ans sur le littoral atlantique ; 1 fois tous les 2 ans dans la section médiane et 1 à 2 fois par an dans la section orientale. Ces grands froids se produisent à la faveur de configurations très singulières, le plus souvent à la suite d'une puissante advection froide d'origine arctique ou continentale (associée à un décrochement de bas géopotentiels polaires). Ce fut le cas jusqu'au littoral le 2 janvier 1997 ($-10,5^{\circ}\text{C}$ à Pornic), en présence d'une bise glaciale de nord-est dans les basses couches et d'une poche froide d'altitude remarquable s'isolant sur l'ouest de la France (température inférieure à -35°C à environ 5300 m d'altitude⁴). Le froid peut même être accentué lorsque succède à cette invasion polaire l'établissement de conditions anticycloniques claires et calmes, combinées à la présence d'un sol couvert de neige amplifiant les effets du rayonnement nocturne. Pour exemple le 17 janvier 1987 : les températures sous abri oscillaient entre -15 à -20°C de l'Anjou à la Sologne, alors qu'en altitude le redoux était déjà bien présent (température voisine de -25°C à plus de 5600 m d'altitude⁴)⁵.

1.3. Caractérisation des gelées et de leurs impacts

En climat océanique des latitudes moyennes, les très fortes gelées hivernales – et *a fortiori* les gelées de moindre intensité – ne sont pas préjudiciables à la vigne car aux dates où elles peuvent se produire, la plante est protégée du froid par l'acquisition des mécanismes d'endurcissement lui permettant de résister à des températures allant de -12°C (en début du repos végétatif ou à la sortie de l'hiver) jusqu'à -25°C (en plein cœur de la saison froide) (Mills *et al.*, 2006). En revanche, dès l'éclatement des bourgeons, les effets du gel sont présents vers -5°C quand l'air est sec, et à seulement -2°C quand l'air est humide (Itier *et al.*, 1991 ; Luisetti *et al.*, 1991 ; Fuller et Telli, 1999).

Au printemps, il suffit donc de quelques heures de faible gelée pour remettre en cause le développement végétal. Les dégâts sur la vigne et d'autres plantes (cultivées ou non) sont d'autant plus marqués que l'événement gélif aura été précédé par une période de quelques jours de chaleur provoquant une augmentation brutale du contenu en eau dans les bourgeons, ce qui accentue la formation de cristaux de glace entraînant des dommages dans les tissus végétaux (Marino *et al.*, 2011). Une autre conséquence de l'événement gélif sur les tissus conducteurs est le phénomène d'embolie caractérisé par la formation de bulles d'air rompant les flux d'eau par cavitation (Sperry et Sullivan, 1992 ; Tyree *et al.*, 1994 ; Cochard *et al.*, 2001 ; Tyree et Zimmermann, 2002 ; Mayr *et al.*, 2007 ; Sevanto *et al.*, 2012). De nombreux cas ont été observés aux États-Unis en 2007 (Gu *et al.*, 2008 ; Augspurger, 2009), en 2010 (Hufkens *et al.*, 2012) et en 2012 (Kistner *et al.*, 2018) ; en France en 1995 (Ningre et Colin, 2007) ; ou encore en Suisse, en Allemagne du Sud et dans le nord-est de la France en 2011 et en 2016 (Kreyling *et al.*, 2012 ; Vitasse *et al.*, 2018).

À un pas de temps plus fin, une chute de pluie précédant un épisode de gel aggrave l'impact de la gelée proprement dite, puisque l'eau peut geler sur la plante elle-même et ainsi provoquer des dégâts à une température plus élevée qu'en situation préalablement sèche (Christner *et al.*, 2008). Ces gelées tardives à forts impacts sont possibles sur le secteur ligérien très

⁴ Valeur correspondant à la surface 500 hPa, référence pour la moyenne atmosphère.

⁵ Les dernières très fortes gelées sur le secteur d'étude remontent à la vague de froid de la deuxième semaine de février 2012 (les valeurs inférieures à -10°C se limitant toutefois à l'est de la région angevine).

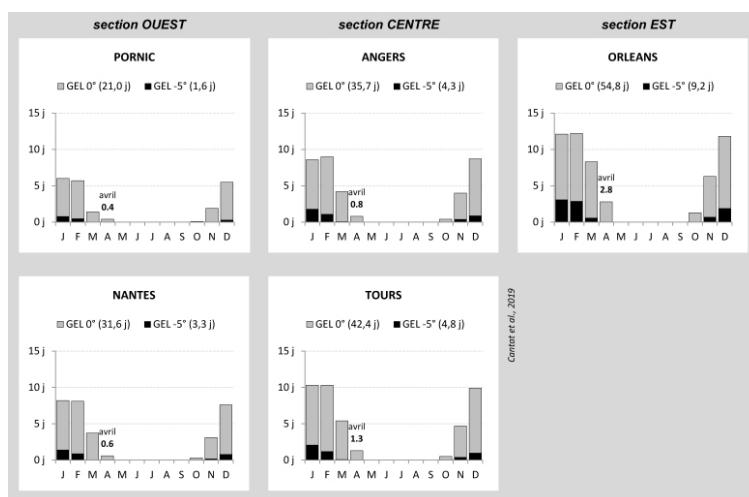
exceptionnellement jusqu'au début du mois de mai⁶. L'année 2019 illustre les conséquences majeures possibles pour la production viticole⁷ (Agreste, 2019).

Sur la Normale climatique d'avril 1981-2010 (tableau 1 et figure 3), le risque de gel sous abri croît rapidement de la côte atlantique où il est quasi inexistant (0,4 gelée à Pornic et 0,6 à Nantes, soit environ une fois tous les deux ans)⁸, vers la Sologne où il est plus marquant (2,8 gelées par an à Orléans).

Tableau 1 : Fréquence des gelées sous abri à l'année et en avril le long de la basse et de la moyenne vallée de la Loire sur la Normale climatique 1981-2010 (d'après données Météo-France). *Frost frequency during the year and in April along the lower and middle Loire Valley over the climate normal period 1981-2010 (according to Météo-France data).*

		VALLEE DE LA LOIRE DE L'AVAL VERS L'AMONT				
		Section OUEST		Section CENTRE		Section EST
position		0 km	30 km	120 km	220 km	320 km
distance ≈ océan						
CUMUL ANNUEL		PORNIC	NANTES	ANGERS	TOURS	ORLEANS
GELEE	TN <= 0°C	21,0	31,6	35,7	42,4	54,8
FORTE GELEE	TN <= -5°C	1,6	3,3	4,3	4,8	9,2
TRES FORTE GELEE	TN <= -10°C	0,1	0,5	0,5	0,7	1,2
CUMUL EN AVRIL		PORNIC	NANTES	ANGERS	TOURS	ORLEANS
GELEE	TN <= 0°C	0,4	0,6	0,8	1,3	2,8
FORTE GELEE	TN <= -5°C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Figure 3 : Fréquence mensuelle des gelées (TN <= 0°C) et fortes gelées (TN <= -5°C) le long de la basse et de la moyenne vallée de la Loire sur la Normale 1981-2010 (d'après données Météo-France). *Monthly frequency of frosts (TN <= 0°C) and strong frosts (TN <= -5°C) along the lower and middle Loire Valley over the climate normal period 1981-2010 (according to Météo-France data).*



⁶ Entre 1951 et 2018, le phénomène s'est produit 1 fois à Nantes (-0,9°C le 3 mai 1979), 5 fois à Angers (valeur absolue de -1,6°C le 7 mai 1957) et 15 fois à Orléans (valeur absolue de -3,0°C le 7 mai 1957 également). Sur la période récente (post-1981), les gelées en mai ont totalement disparu à l'ouest du secteur d'étude (Nantes, Angers et Tours) et sont apparues (d'extrême justesse) 1 seule fois à l'est (0°C le 3 mai 1981 à Orléans).

Actualisation : l'année 2019 a enregistré début mai des gelées sous abri de l'Anjou à la Sologne, avec des températures sous abri très légèrement négatives à Angers, Tours et Orléans (-0,1 et -0,2°C), et localement plus sévères comme à Romorantin (-3,8°C), station dont nous reparlerons ultérieurement dans les effets topoclimatiques. Ce froid extrêmement tardif a surtout été très préjudiciable dans les vignobles de l'ouest, du sud-ouest et de l'est de la France (et pays limitrophes, par exemple au Luxembourg : Molitor *et al.*, 2019).

⁷ Selon une estimation publiée fin août 2019 par l'Agreste (service de statistique du ministère de l'agriculture), « la production viticole 2019 s'établirait à 43,4 millions d'hectolitres. La récolte viticole 2019 serait inférieure de 12 % à celle de 2018, qui avait bénéficié de conditions climatiques favorables à la floraison. Elle pourrait être l'une des plus basses des cinq dernières années, après la récolte 2017, historiquement réduite par un gel de grande ampleur. La floraison de nombreux vignobles s'est déroulée dans des conditions climatiques défavorables (précipitations et froid), conduisant à de la coulure (chute des fleurs ou des jeunes baies) et parfois du millerandage (baies de petite taille). Les bassins de la façade Ouest du pays sont les plus touchés. ».

⁸ Le dernier exemple en date s'est produit le 4 avril 2019, avec des dégâts marqués dans les vignobles du Pays nantais, en raison de températures sous abri oscillant sur toute la partie occidentale et centrale du secteur d'étude entre 0 à -3°C durant 3 à 6 heures consécutives (-1,6°C sous abri à la station de Nantes-Bouguenais pour un total de 258 mn de gel, entre 03h05 et 07h23 UTC).

1.3.1. Variabilité interannuelle des gelées tardives

Au regard des risques encourus par les plants de vigne, ces premiers constats conduisent à analyser l'évolution du climat sur les dernières décennies (figure 4).

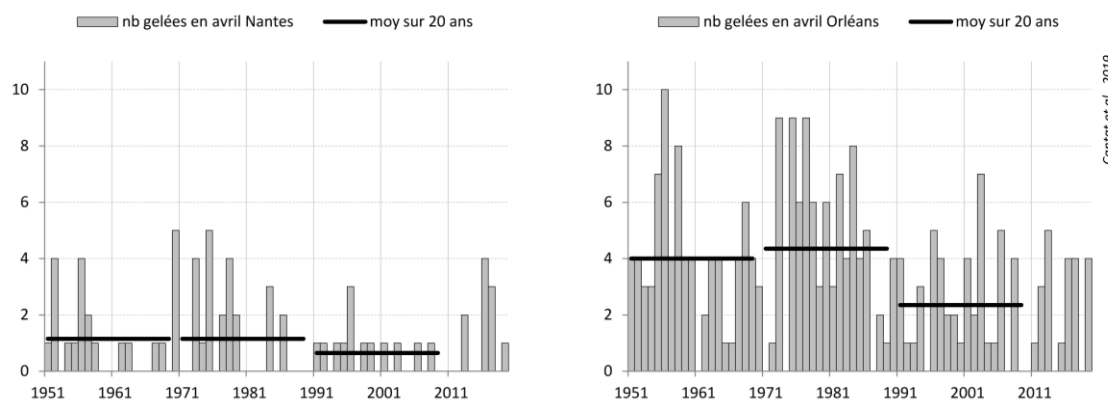


Figure 4 : Variabilité interannuelle des gelées en avril, de l'aval (Nantes) vers l'amont (Orléans) du secteur d'étude, sur la période 1951-2019 (d'après données Météo-France). *Interannual variability of frosts in April, from downstream (Nantes) to upstream (Orléans) of the study area, over the period 1951-2019 (according to Météo-France data).*

En accord avec le changement climatique contemporain, on observe une réduction du nombre de jours de gelées le long de la vallée de la Loire, comme partout en France et en Europe (IPCC, 2013). Dans la partie aval ici représentée par Nantes, la fréquence déjà très faible historiquement de ce type d'événements (moyenne à peine supérieure à 1 jour par mois en avril sur les périodes vicennales 1951-1970 et 1971-1990) descend maintenant sous le seuil de l'unité sur la dernière période de référence (1991-2010). Mais au-delà de cette observation, on note la grande variabilité interannuelle de ces occurrences de gels tardifs, notamment au cours des dix dernières années durant lesquelles se sont succédés des printemps totalement dépourvus de ce phénomène (0 cas en 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2018) et à l'opposé des années autant touchées que lors des décennies précédant le réchauffement climatique (4 cas en 2016, 3 cas en 2017).

Pour l'amont du secteur d'étude, on retrouve avec Orléans les mêmes trajectoires évolutives mais avec une fréquence plus élevée du fait de la continentalité (moyenne vicennale passant d'environ 4 à 2 occurrences en avril). On observe également une alternance d'années sans aucun risque de gel (0 cas en 2009, 2010, 2014, 2018) et d'années récentes subissant cette contrainte (4 cas en 2016, 2017, 2019), mais ici sans approcher les totaux atteints antérieurement à l'élévation généralisée des températures amorcée dans le milieu des années 1980 (10 cas en 1956 ; 9 cas en 1973, 1975, 1977). Dans la période de pré réchauffement climatique, la durée moyenne des séquences de gel était plus longue : 1,88 jour sur 1951-1987 contre 1,55 jour sur 1988-2019 à Orléans⁹, et à Nantes de 1,55 jour autrefois à 1,35 jour actuellement. En plus de la durée du gel, il conviendrait de préciser ce qui est le plus préjudiciable aux plants de vigne : plusieurs petites gelées consécutives ou une forte gelée isolée ?¹⁰

⁹ Les plus longues séries de gelées en avril à Orléans ont toutes eu lieu dans la période antérieure à 1988 : 7 jours, du 1^{er} au 7 avril 1975 (avec un minimum de -3,9°C le 6) ; 6 jours du 9 au 14 avril 1982 (avec un minimum de -2,0°C le 10). Sur la période actuelle, le record est de 5 jours consécutifs en 2003, entre le 7 et le 11 avril (avec un minimum de -4,2°C le 8 avril).

¹⁰ Au cours de la plus longue série de gelées consécutives à Orléans (du 1^{er} au 7 avril 1975), excepté le 6 avril les gelées n'ont pas été de grande intensité. La série se compose des sept valeurs suivantes : -1,6 ; -0,2 ; 0,0 ; -1,5 ; -0,1 ; -3,9 et -1,9°C. Comparativement, avril 2003 présente une série un peu plus courte (5 jours) mais avec des

1.3.2. Variabilité interannuelle du cycle végétatif de la vigne

Si les gelées tardives sont en moyenne moins présentes qu’au cours des décennies passées, lorsque le phénomène se produit, il peut en revanche être plus destructeur pour les plantes car le réchauffement provoque une entrée en végétation plus précoce, donc une vulnérabilité des plantes supérieure pour une date de survenue du gel identique. Pour illustrer l’accroissement de ce risque, la somme des températures maximales journalières supérieures à 10°C du 1^{er} janvier au 31 mars de chaque année est révélatrice, à Nantes comme à Orléans (figure 5). Le choix des températures maximales s’appuie sur les travaux de McIntyre *et al.* (1982) qui obtiennent de bons résultats pour la prévision de la date de débourrement. L’usage de modèles certainement plus performants mais plus complexes, tel que BRIN (García De Cortázar-Atauri *et al.*, 2009) n’a pas été retenu dans la présente étude afin de privilégier une approche sur des dates calendaires, davantage que sur un stade végétatif simulé.

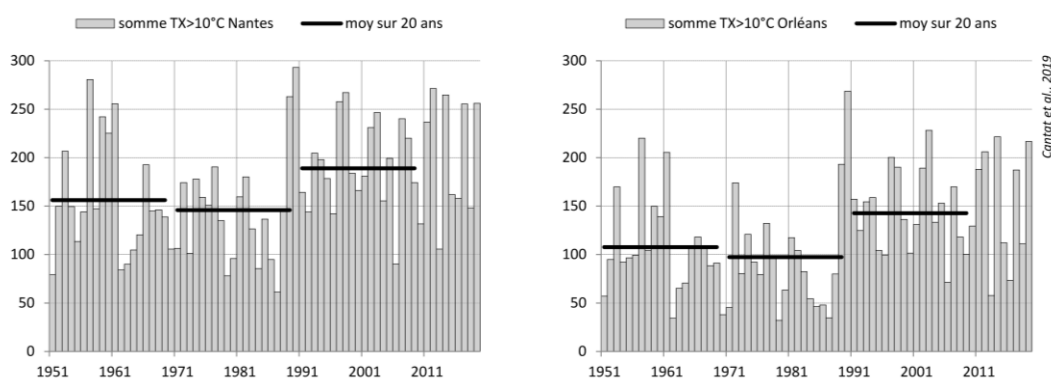


Figure 5 : Variabilité interannuelle de la somme des températures maximales supérieures à 10°C (en degré-jour) du 1^{er} janvier au 31 mars, de l’aval (Nantes) vers l’amont (Orléans) du secteur d’étude, sur la période 1951-2019 (d’après données Météo-France). *Interannual variability of the sum of the maximum temperatures above 10°C from January 1st to March 31st (expressed in degree-day) from the downstream (Nantes) to upstream (Orléans) of the study area, over the period 1951- 2019 (according to Météo-France data).*

Pour Nantes, la somme de chaleur est passée d’environ 150 à 190°C-jour entre 1971-1990 et 1991-2010, se traduisant dans les faits pour les vignerons par une nette avancée de la phase de débourrement post-hivernal et de l’ensemble des stades phénologiques qui suivent (Barbeau, 2007). A Orléans, la progression est comparable, avec un gain de l’ordre de 50°C-jour (de 100 à 150°C-jour). Mais ici, la somme de chaleur étant plus faible, les gelées tardives bien que plus fréquentes sont moins à risque car elles touchent une végétation plus en retard, comparativement à l’aval du bassin. A titre de comparaison spatio-temporelle, notons que sur la période actuelle, la somme des températures à Orléans est équivalente à celle qui était enregistrée à Nantes dans la période de pré réchauffement climatique précédant la fin des années 1980. En cas de renouvellement des pieds de vigne, ceci peut être important dans le choix des cépages les plus adaptés à cette nouvelle donne climatique (Barbeau *et al.*, 2015 ; Ollat *et al.*, 2016 ; Quénol *et al.*, 2016 ; Neethling *et al.*, 2017).

Au-delà de ces moyennes et tendances *a priori* plus favorables à la vigne, la variabilité interannuelle pose de graves problèmes quand se combinent une sortie précoce d’hiver et une gelée tardive. En croisant l’avancée du calendrier phénologique (estimée grâce à la somme des températures maximales) et la date de survenue de la gelée (figure 6), on visualise pour Nantes

intensités de froid plus marquées : -0,5 ; -4,2 ; -3,0 ; -1,6 et -3,8. Cette série se rapproche de celle du 12 au 15 avril 1957 durant laquelle les températures minimales se sont rapprochées du seuil de grand froid (-5°C) en fin de séquences : -3,5 ; -2,0 ; -4,1 et -4,4.

l'impact possible des faibles gelées des 3^{èmes} décades d'avril 2016 et 2017. La succession de trois gelées à cette date est sans équivalent au moins sur les sept dernières décennies.

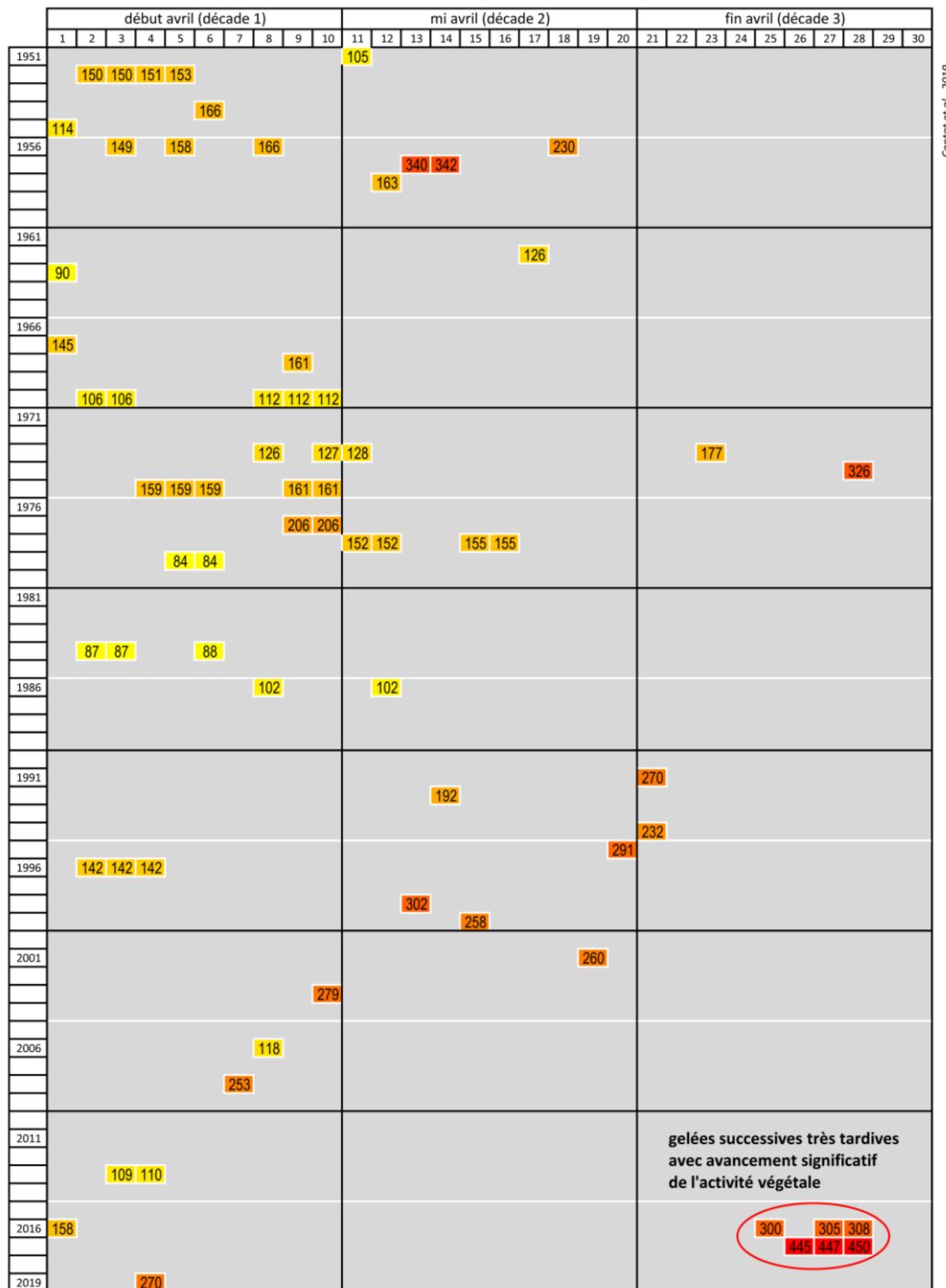


Figure 6 : Somme des températures maximales supérieures à 10°C (en degré-jour) depuis le 1^{er} janvier de l'année en cours jusqu'à la date de chaque gelée sous abri à Nantes en avril, entre 1981 et 2019 (d'après données Météo-France). *Sum of maximum temperatures above 10°C (in degree-day) from January 1st of the current year to the date of each frost event in shelter at Nantes in April, between 1981 and 2019 (according to Météo-France data).*

En avril 2017, ces gelées intervinrent à un stade phénologique très avancé en raison d'un fort cumul de chaleur sur les mois précédents (450°C-jour), bien supérieur à la moyenne vicennale 1991-2010 (337°C-jour), et plus encore si l'on retient comme référence la période de

pré réchauffement (275°C-jour). Notons qu'en 2007 et 2011, la végétation était encore plus en avance mais sans conséquence sur la vigne en l'absence de gelées tardives¹¹.

Indépendamment de la variabilité interannuelle des températures, la fin avril est une période de fort risque pour les vignobles car la somme de chaleur est dans tous les cas suffisante pour entraîner le déclenchement de la phase de croissance, donc de vulnérabilité de la plante. La précocité végétale apparaît alors comme un facteur aggravant mais pas forcément nécessaire pour provoquer des dégâts. Ainsi, les gelées de la fin avril 2016 furent désastreuses sur de nombreux vignobles de France et d'autres pays d'Europe occidentale et centrale (De Brouwer, 2016 ; Kühner, 2017 ; de Rességuier *et al.*, 2018 ; Gavrilesco *et al.*, 2019) non parce que la végétation était en avance par rapport à la saison¹², mais car elles se sont produites très tardivement, donc sur une végétation naturellement sensible.

2. Le rôle de la circulation atmosphérique sur l'occurrence des gelées tardives en moyenne et basse vallée de la Loire

La survenue d'épisodes froids tardifs est sous la dépendance première d'éléments d'échelle synoptique dont on peut mettre en évidence les principaux caractères à l'aide de diverses classifications des types de circulation atmosphérique.

2.1. Méthode d'analyse et données : l'utilisation du catalogue Hess-Brezowsky

L'analyse des contextes météorologiques d'échelle synoptique propices aux gelées en vallée de la Loire s'appuie ici sur le calendrier des types de circulation atmosphérique (Großwetterlagen ou en abrégé GWL) définis par Hess et Brezowsky (1952), dans le prolongement de la première classification des bulletins météorologiques quotidiens réalisée par Baur en 1948 (Douguedroit, 2004 ; Werner et Gerstengarbe, 2010). La méthode a été réactualisée ensuite par l'introduction des données d'altitude grâce à la généralisation des radiosondages à la fin des années 1960, puis par les travaux de Paul James (2007) qui ajouta notamment une méthode de classification objective entièrement automatisée. La méthode de classification retenue dans ce travail, pour des raisons de droit d'accès, est celle dite 'subjective', c'est-à-dire développée et mise à jour de façon manuelle. De nombreuses références sur la méthodologie, l'utilisation et les applications de cette classification sont citées notamment par P.C. Werner & F.-W. Gerstengarbe (2010). Le catalogue quotidien des types de circulation de Hess-Brezowsky, archivé et mis à jour par le Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) jusqu'en 2009 (Werner et Gerstengarbe, 2010), est, depuis 2003, régulièrement mis à jour et publié par le Deutscher Wetterdienst (météorologie nationale allemande) suivant la même méthodologie. Le chevauchement des deux séries entre 2003 et 2009 a permis de vérifier la bonne correspondance des types de circulation entre les différentes sources.

La méthode Hess-Brezowsky s'appuie sur le champ de pression au niveau de la mer et vers 5500 m d'altitude (géopotential 500 hPa) au-dessus de l'Océan Atlantique Nord et de l'Europe (Werner et Gerstengarbe, 2010). La classification identifie 29 types de circulations (GWL), pouvant être regroupés en 5 classes (Großwettertypen ou GWT : Bárdossy et Caspary, 1990 ; Fallot, 2000 ; Gerstengarbe et Werner, 2005). La classification Hess-Brezowsky et le catalogue des GWL/GWT ont déjà été utilisés dans des travaux traitant de l'impact des types de circulations générant des gelées sur des régions viticoles européennes (Quénol *et al.*, 2008 ;

¹¹ Somme de chaleur de 532°C-jour le 28 avril 2011 mais dernière gelée le 7 février, soit deux mois et demi plus tôt, en phase de dormance.

¹² Somme de température légèrement inférieure à la moyenne et mois de mars et avril 1°C sous la Normale.

Planchon *et al.*, 2009 ; Planchon *et al.*, 2015). L'accent a jusqu'à présent surtout été mis sur le printemps, saison la plus sensible pour la vigne mais aussi pour les vergers (Planchon *et al.*, 2019).

2.2. Répartition des 5 classes de circulation atmosphérique lors des gelées

En avril, sur l'Europe de l'Ouest le contexte synoptique se caractérise par le paroxysme du ralentissement de la circulation zonale (12,7 %, des cas contre 34,8 % en hiver) et au contraire une nette recrudescence des circulations méridiennes (52,8 % des cas, contre 39,4 % en hiver) (tableau 2).

GWT (Grosswettertypen)	A/ Classes de circulation			B/ Classes de circulation avec gelées		
	HIVER (D-J-F)	AVRIL	écart AVRIL / HIVER	GELÉE HIVER	GELÉE AVRIL	écart AVRIL / HIVER
Circulations d'Ouest	34,8 %	12,7%	- 22,1 %	13,2 %	5,1 %	- 8,1 %
Circulations de Sud	14,6 %	26,0 %	+ 11,4 %	8,8 %	12,8 %	+ 4,0 %
Circulations de Nord-Ouest et de Nord	24,8 %	26,8 %	+ 2,0 %	36,1 %	48,7 %	+ 12,6 %
Circulations de Nord-Est et d'Est	7,1 %	8,4 %	+ 1,3 %	13,2 %	7,7 %	- 5,5 %
Centre d'action sur l'Europe centrale	18,0 %	25,0 %	+ 7,0 %	28,0 %	25,6 %	- 2,4 %
Indéterminées	0,7 %	1,1 %	+ 0,4 %	0,7 %	0,0 %	-0,7 %
Somme	100 %	100 %	0 %	100%	100%	0%

 Cantat *et al.*, 2019

Tableau 2 : Fréquence des 5 classes de circulation atmosphérique (GWT) en hiver et en avril (A) et lors des gelées à Tours (B) sur la Normale climatique 1981-2010, d'après la classification de Hess et Brezowsky (d'après données Météo-France et Deutscher Wetterdienst). *Frequency of the 5 classes of atmospheric circulation patterns (GWT) in winter and April (A) and during the frost events in Tours (B) over the climate normal period 1981-2010, according to the classification of Hess and Brezowsky (according to Météo-France and Deutscher Wetterdienst).*

Comparativement à l'hiver, une redistribution apparaît parmi les flux méridiens entre la composante sud en forte progression (26,0 %, +11,4 %) et la composante nord en faible augmentation (26,8 %, +2,0 %) (tableau 2A). La succession parfois rapprochée de ces circulations méridiennes explique les sautes de température coutumières au printemps sur l'Europe (Planchon et Endlicher, 2014). Le temps est par conséquent souvent très contrasté au printemps, d'une semaine à une autre, comme d'une région à une autre, car la dynamique de l'atmosphère peut faire alterner rapidement situations à caractère encore hivernal et premiers signes tangibles de l'été (Cantat, 2015).

En s'appuyant sur les données de température sous abri dans la partie médiane du secteur d'étude (station de Tours), la distribution des classes de circulation paraît beaucoup plus sélective pour les gelées tardives que pour les gelées hivernales (tableau 2B et figure 7). On remarque la plus forte emprise des flux de nord-ouest à nord qui constituent alors presque la moitié des configurations (48,7 %), contre un peu plus du tiers seulement en hiver (36,1 %). La deuxième source de gelées tardives trouve son origine dans les situations à centres d'action sur l'Europe centrale (25,6 %) dont les influences froides peuvent alors déborder vers l'ouest du continent et favoriser la survenue de gelées tardives jusqu'en vallée de la Loire. Pour les 20 % restant, les classes de circulation sont moins conformes aux stéréotypes attendus pour des temps froids au printemps :

- ainsi, les circulations de sud ne sont pas totalement incompatibles avec le gel (12,8 %) et même proportionnellement plus fréquentes qu'en hiver (8,8 %). On peut envisager ici le rôle d'un flux généralement moins dynamique qu'en hiver et sa légère continentalisation en cheminant depuis le sud du pays *via* l'Espagne, ce qui permet par temps clair l'établissement

temporaire d'inversion de température avant l'arrivée de nouvelles perturbations (situation de transition) ;

- *a contrario*, les gelées associées à des flux continentaux de nord-est et d'est ne représentent plus que 7,7 % des cas, contre 13,2 % en hiver. La froidure advectée dans les basses couches par les anticyclones nordiques n'apparaît alors pas suffisante pour risquer le gel en vallée de la Loire, d'autant plus que le vent souvent présent dans ce genre de situation empêche les inversions thermiques.

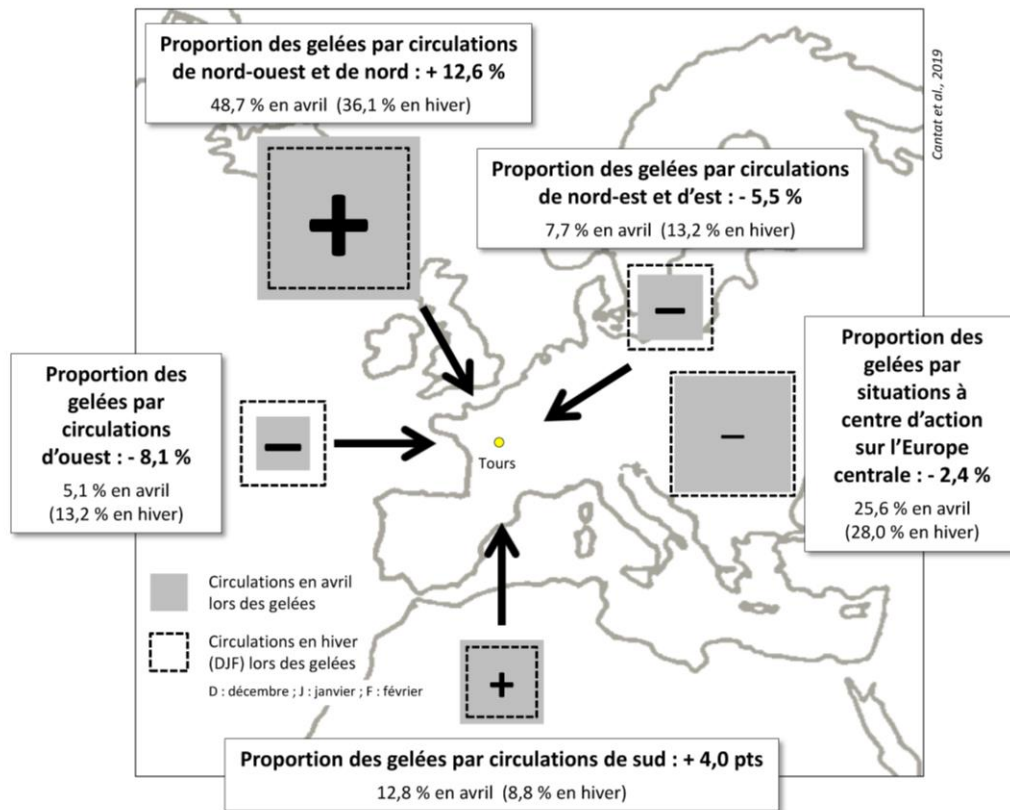


Figure 7 : Comparaison de la proportion des 5 classes de circulation atmosphérique (GWT) lors des gelées à Tours en avril par rapport à l'hiver sur la Normale climatique 1981-2010, d'après la classification de Hess et Brezowsky (d'après données Météo-France et Deutscher Wetterdienst). *Comparison of the proportion of the 5 classes of atmospheric circulation patterns (GWT) during the frost events in Tours in April compared to the winter frosts over the climate normal period 1981-2010, according to the classification of Hess and Brezowsky (according to Météo-France and Deutscher Wetterdienst).*

Les gelées par flux de composante ouest deviennent anecdotiques (5,1 % en avril contre 13,2 % en hiver). Ce type de circulation, qui succède souvent au flux de sud s'établissant à l'avant des perturbations, est moins favorable à la gelée car la masse d'air océanique est adoucie à cette saison et que le temps plus nébuleux et agité limite le refroidissement nocturne.

2.3. Efficacité gélive des 5 classes de circulation atmosphérique

Le calcul du ratio des gelées sous abri à Tours (relativement au nombre total d'occurrence des cinq classes de circulation atmosphérique) permet de caractériser l'efficacité gélive des configurations synoptiques, indépendamment de leurs fréquences d'apparition (tableau 3). En ce sens, cette approche complète la précédente et en précise certains aspects.

Au mois d'avril, les coefficients d'efficacité gélive présentent logiquement de plus faibles valeurs qu'en hiver et ont la particularité de proposer une hiérarchisation différente : les circulations de nord-ouest et de nord prennent alors en moyenne l'ascendant (7,9 %) sur celles

commandées par des centres d'action sur l'Europe centrale (4,4 %), et de façon plus inattendue encore sur celles de nord-est et d'est (3,9 %).

GWT (Grosswettertypen)	A/ Classes circulations d'hiver			B/ Classes circulations d'avril		
	TOUTES (nombre)	GELÉE (nombre)	Efficacité	TOUTES (nombre)	GELÉE (nombre)	Efficacité
Circulations d'Ouest	942	121	12,8 %	114	2	1,8 %
Circulations de Sud	395	81	20,5 %	234	5	2,1 %
Circulations de Nord-Ouest et de Nord	671	330	49,2 %	241	19	7,9 %
Circulations de Nord-Est et d'Est	192	121	63,0 %	76	3	3,9 %
Centre d'action sur l'Europe centrale	487	256	52,6 %	225	10	4,4 %
Indéterminées	20	6	30,0 %	10	0	0,0 %
Toutes circulations	2707	915	33,8 %	900	39	4,3 %

Cantat et al., 2019

Tableau 3 : Efficacité des 5 classes de circulation atmosphérique sur les gelées à Tours en hiver (A) et en avril (B) sur la Normale climatique 1981-2010, d'après la classification de Hess et Brezowsky (d'après données Météo-France et Deutscher Wetterdienst). *Impact of the 5 classes of atmospheric circulation patterns on the frost in Tours in winter (A) and in April (B) over the climate normal period 1981-2010, according to the classification of Hess and Brezowsky (according to Météo-France and Deutscher Wetterdienst)*

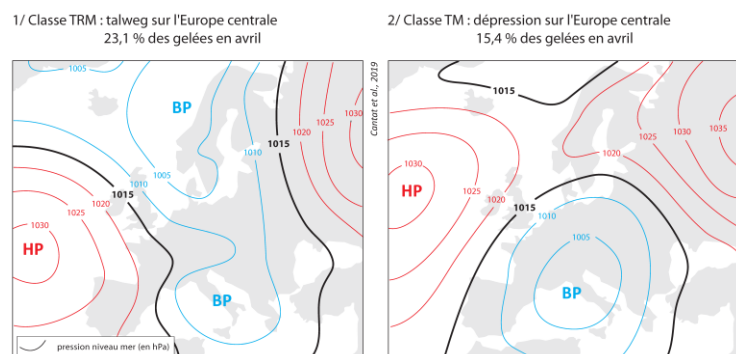
Cela traduit le fait qu'en avril, le continent européen est sorti de l'hiver et que les advections froides à tous les niveaux d'altitude, nécessaires à la formation des gelées en vallée de la Loire, trouvent davantage leurs origines dans les flux provenant du Grand Nord qui conserve encore des réserves froides importantes pouvant s'écouler vers l'Europe occidentale, au gré de la position des centres d'action barométriques (Quénol *et al.*, 2008 ; Planchon et Endlicher, 2014).

Les flux d'ouest (océanisés) et de sud (tropicalisés) porteurs de gelées présentent conformément à leurs origines un ratio très faible : coefficient d'efficacité de 1,8 % pour les flux d'ouest (2 cas sur 114 entre 1981 et 2010) et de 2,1 % pour les flux de sud (5 cas sur 234 sur la même période).

2.4. Apport de l'ensemble des types de circulation atmosphérique (GWL)

A l'aide des 29 GWL (tableau 4), il est possible de caractériser plus précisément les configurations responsables des gelées tardives. Ressortent ici nettement deux types de GWL qui, bien qu'appartenant à deux GWT différents, présentent des situations synoptiques assez proches, caractérisées par la présence d'un talweg (figure 8) : pour l'un sur l'Europe continentale (TRM : 23,1 %) et pour l'autre sur l'Europe occidentale (TM : 15,4 %). Leur conséquence commune est d'amener au-dessus du Val de Loire de l'air froid, en accord avec une zone de bas géopotentiels rarement présents à ces latitudes à cette époque de l'année.

Figure 8 : Situations synoptiques correspondant aux plus fortes fréquences de gelées en avril à Tours sur la Normale climatique 1981-2010, d'après la classification de Hess et Brezowsky (d'après données ECMWF ERA-40). *Synoptic situations corresponding to the highest frost frequencies in April at Tours over the climate normal period 1981-2010, according to the classification of Hess and Brezowsky (according to data ECMWF ERA-40).*



code	GWL	GWT	descriptif du type de circulation	A/ Tous types de circulations				B/ Circulations avec gelées			
				nb cas		% cas		nb cas		% cas	
				HIVER	AVRIL	HIVER	AVRIL	HIVER	AVRIL	HIVER	AVRIL
WA	1	1	Circulation d'ouest anticyclonique	158	13	5,8 %	1,4 %	40	1	4,4 %	2,6 %
WZ	2	1	Circulation d'ouest cyclonique	575	73	21,2 %	8,1 %	47	0	5,1 %	0 %
WS	3	1	Circulation d'ouest méridionale	115	14	4,2 %	1,6 %	33	1	3,6 %	2,6 %
WW	4	1	Circulation d'ouest « formant un angle »	94	14	3,5 %	1,6 %	1	0	0,1 %	0 %
<i>Circulations d'Ouest</i>				942	114	34,8 %	12,7 %	121	2	13,2 %	5,1 %
SWA	5	2	Circulation de sud-ouest, anticyclonique	98	29	3,6 %	3,2 %	10	0	1,1 %	0 %
SWZ	6	2	Circulation de sud-ouest, cyclonique	84	39	3,1 %	4,3 %	4	1	0,4 %	2,6 %
SA	7	2	Circulation de sud, anticyclonique	41	5	1,5 %	0,6 %	5	0	0,5 %	0 %
SZ	8	2	Circulation de sud, cyclonique	9	4	0,3 %	0,4 %	1	0	0,1 %	0 %
TB	9	2	Dépression sur les îles Britanniques	14	24	0,5 %	2,7 %	1	1	0,1 %	2,6 %
TRW	10	2	Talweg sur l'Europe occidentale	60	103	2,2 %	11,4 %	16	3	1,7 %	7,7 %
SEA	11	2	Circulation de sud-est, anticyclonique	62	15	2,3 %	1,7 %	32	0	3,5 %	0 %
SEZ	12	2	Circulation de sud-est, cyclonique	27	15	1 %	1,7 %	12	0	1,3 %	0 %
<i>Circulations de Sud</i>				395	234	14,6 %	26 %	81	5	8,9 %	12,8 %
NWA	13	3	Circulation de nord-ouest, anticyclonique	57	9	2,1 %	1 %	23	0	2,5 %	0 %
NWZ	14	3	Circulation de nord-ouest, cyclonique	226	29	8,3 %	3,2 %	76	3	8,3 %	7,7 %
NA	15	3	Circulation de nord, anticyclonique	11	3	0,4 %	0,3 %	7	0	0,8 %	0 %
NZ	16	3	Circulation de nord, cyclonique	64	26	2,4 %	2,9 %	38	2	4,2 %	5,1 %
HNA	17	3	Anticyclone sur l'Islande, anticyclonique	45	44	1,7 %	4,9 %	30	1	3,3 %	2,6 %
HNZ	18	3	Anticyclone sur l'Islande, cyclonique	30	21	1,1 %	2,3 %	16	3	1,7 %	7,7 %
HB	19	3	Anticyclone sur les îles Britanniques	84	39	3,1 %	4,3 %	58	1	6,3 %	2,6 %
TRM	20	3	Talweg sur l'Europe centrale	154	70	5,7 %	7,8 %	82	9	9 %	23,1 %
<i>Circulations de Nord-Ouest et de Nord</i>				671	241	24,8 %	26,8 %	330	19	36,1 %	48,7 %
NEA	21	4	Circulation de nord-est, anticyclonique	14	0	0,5 %	0 %	10	0	1,1 %	0 %
NEZ	22	4	Circulation de nord-est, cyclonique	12	4	0,4 %	0,4 %	7	0	0,8 %	0 %
HFA	23	4	Anticyclone sur la Fennoscandie, anticyclonique	63	6	2,3 %	0,7 %	33	0	3,6 %	0 %
HFZ	24	4	Anticyclone sur la Fennoscandie, cyclonique	34	32	1,3 %	3,6 %	15	3	1,6 %	7,7 %
HNFA	25	4	Anticyclo. sur mer de Norvège – Fennoscandie, anticyclo.	20	10	0,7 %	1,1 %	14	0	1,5 %	0 %
HNFZ	26	4	Anticyclo. sur mer de Norvège – Fennoscandie, cyclo.	49	24	1,8 %	2,7 %	42	0	4,6 %	0 %
<i>Circulations de Nord-Est et d'Est</i>				192	76	7,1 %	8,4 %	121	3	13,2 %	7,7 %
HM	27	5	Anticyclone sur l'Europe centrale	211	52	7,8 %	5,8 %	121	1	13,2 %	2,6 %
BM	28	5	Dorsale anticyclonique sur l'Europe moyenne	251	139	9,3 %	15,4 %	120	3	13,1 %	7,7 %
TM	29	5	Dépression sur l'Europe centrale	25	34	0,9 %	3,8 %	15	6	1,6 %	15,4 %
<i>Centre d'action sur l'Europe centrale</i>				487	225	18 %	25 %	256	10	28 %	25,6 %
U	30	0	indéfini	20	10	0,7 %	1,1 %	6	0	0,7 %	0 %
TOTAL				2707	900	100 %	100 %	915	39	100 %	100 %

Cantat et al., 2019

Tableau 4 : Fréquence de tous les types de circulation atmosphérique (GWL) en hiver et en avril (A) et lors des gelées à Tours (B) sur la Normale climatique 1981-2010, d'après la classification de Hess et Brezowsky (d'après données Météo-France et Deutscher Wetterdienst). *Frequency of all types of atmospheric circulation patterns (GWL) in winter and April (A) and during the frost events in Tours (B) over the climate normal period 1981-2010, according to the classification of Hess and Brezowsky (from data Météo-France and Deutscher Wetterdienst).*

Les services météorologiques parviennent en général à bien prévoir ce genre de configuration synoptique, ce qui permet d'alerter plusieurs jours à l'avance des risques de gel tardif et d'envisager divers moyens pour tenter de protéger les vignes : brassage de l'air pour contrecarrer la formation de l'inversion thermique, brûlage de paille¹³ d'efficacité improbable (Snyder et Melo-Abreu, 2005)... (cf. photographie 1).

¹³ La pratique de l'enfumage des vignes est connue de longue date par les agrométéorologues (cf. monographie de la FAO sur la lutte contre le gel de printemps par Snyder et Melo-Abreu, 2005). Elle n'est probablement d'aucune efficacité (sauf si des très grandes quantités de paille humide sont consommées et si la fumée est maintenue au-dessus des vignobles, ce qui est très aléatoire), mais en revanche, on constate qu'elle provoque des accidents de la route, pollue l'air et nuit au voisinage...



Photographie 1 : à gauche, feux de paille installés pour protéger les vignes du gel, in « Week-end de portes ouvertes... et du gel » (La Nouvelle République, 20/04/2019) ; à droite, turbine, in « Touraine : branle-bas de combat dans les vignes contre le gel » (La Nouvelle République, 05/04/2019). *On the left, straw fires installed to protect the vines from frost, in « Week-end de portes ouvertes... et du gel » (La Nouvelle République, 20/04/2019); on the right, turbine, in « Touraine : branle-bas de combat dans les vignes contre le gel » (La Nouvelle République, 05/04/2019).*

L'apport d'air froid en altitude lié au talweg différencie nettement les gelées printanières de celles d'hiver, moins exigeantes sur le caractère froid de la masse d'air sur toute son épaisseur. Les gelées hivernales sont en effet majoritairement la conséquence des inversions de température se produisant lors de situations anticycloniques claires et calmes (figure 9), l'air froid formé au contact du substratum pouvant alors être surmonté par de l'air relativement plus chaud associé à des hauts géopotentiels d'origine subtropical débordant sur le sud et l'ouest de l'Europe.

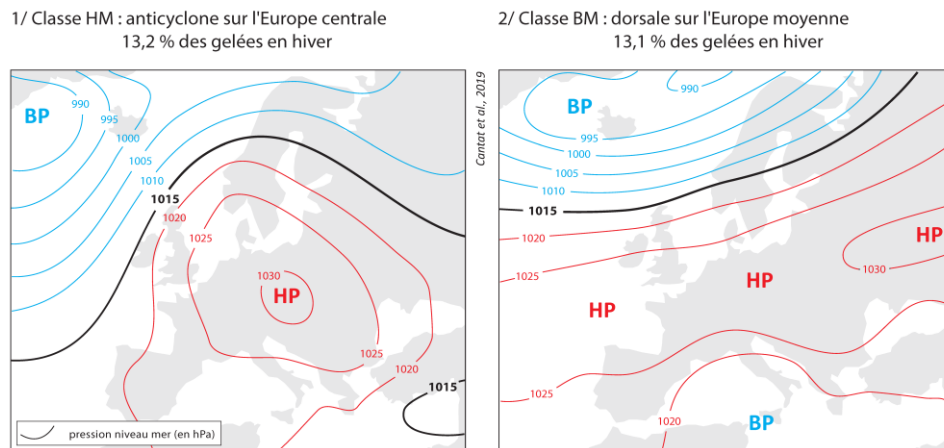


Figure 9 : Situations synoptiques correspondant aux plus fortes fréquences de gelées en hiver (décembre-janvier-février) à Tours sur la Normale climatique 1981-2010, d'après la classification de Hess et Brezowsky (d'après données ECMWF ERA-40). *Synoptic situations corresponding to the highest frost frequencies in winter (December-January-February) in Tours over the climate normal period 1981-2010, according to the Hess and Brezowsky classification (according to ECMWF data ERA-40).*

En termes d'efficacité gélive (tableau 5), les situations printanières sont associées très préférentiellement à des circulations cycloniques de composante nord, avec une dominance des types TM (*Dépression sur l'Europe centrale* ; 17,6 %), puis HNZ (*Anticyclone sur l'Islande, cyclonique* ; 14,3 %), TRM (*Talweg sur l'Europe centrale* ; 12,9 %) et NWZ (*Circulation de nord-ouest, cyclonique* ; 10,3 %). A noter qu'aucune gelée n'est enregistrée en avril lors de circulations cycloniques sous blocage scandinave (HNFZ : *Anticyclone sur la Mer de Norvège-*

Fennoscandie ; 0 cas sur 24), alors qu'en hiver cela constitue un type où le seuil de 0°C est presque systématiquement franchi (42 gelées sur 49 cas, soit 85,7 %).

code	GWL	GWT	descriptif du type de circulation	A/ Classes circulations d'hiver			B/ Classes circulations d'avril		
				TOUTES (nombre)	GELÉE (nombre)	Efficacité (%)	TOUTES (nombre)	GELÉE (nombre)	Efficacité (%)
WA	1	1	Circulation d'ouest anticyclonique	158	40	25,3 %	13	1	7,7 %
WZ	2	1	Circulation d'ouest cyclonique	575	47	8,2 %	73	0	0 %
WS	3	1	Circulation d'ouest méridionale	115	33	28,7 %	14	1	7,1 %
WW	4	1	Circulation d'ouest « formant un angle »	94	1	1,1 %	14	0	0 %
<i>Circulations d'Ouest</i>				942	121	12,8 %	114	2	1,8 %
SWA	5	2	Circulation de sud-ouest, anticyclonique	98	10	10,2 %	29	0	0 %
SWZ	6	2	Circulation de sud-ouest, cyclonique	84	4	4,8 %	39	1	2,6 %
SA	7	2	Circulation de sud, anticyclonique	41	5	12,2 %	5	0	0 %
SZ	8	2	Circulation de sud, cyclonique	9	1	11,1 %	4	0	0 %
TB	9	2	Dépression sur les îles Britanniques	14	1	7,1 %	24	1	4,2 %
TRW	10	2	Talweg sur l'Europe occidentale	60	16	26,7 %	103	3	2,9 %
SEA	11	2	Circulation de sud-est, anticyclonique	62	32	51,6 %	15	0	0 %
SEZ	12	2	Circulation de sud-est, cyclonique	27	12	44,4 %	15	0	0 %
<i>Circulations de Sud</i>				395	81	20,5 %	234	5	2,1 %
NWA	13	3	Circulation de nord-ouest, anticyclonique	57	23	40,4 %	9	0	0 %
NWZ	14	3	Circulation de nord-ouest, cyclonique	226	76	33,6 %	29	3	10,3 %
NA	15	3	Circulation de nord, anticyclonique	11	7	63,6 %	3	0	0 %
NZ	16	3	Circulation de nord, cyclonique	64	38	59,4 %	26	2	7,7 %
HNA	17	3	Anticyclone sur l'Islande, anticyclonique	45	30	66,7 %	44	1	2,3 %
HNZ	18	3	Anticyclone sur l'Islande, cyclonique	30	16	53,3 %	21	3	14,3 %
HB	19	3	Anticyclone sur les îles Britanniques	84	58	69 %	39	1	2,6 %
TRM	20	3	Talweg sur l'Europe centrale	154	82	53,2 %	70	9	12,9 %
<i>Circulations de Nord-Ouest et de Nord</i>				671	330	49,2 %	241	19	7,9 %
NEA	21	4	Circulation de nord-est, anticyclonique	14	10	71,4 %	0	0	0 %
NEZ	22	4	Circulation de nord-est, cyclonique	12	7	58,3 %	4	0	0 %
HFA	23	4	Anticyclone sur la Fennoscandie, anticyclonique	63	33	52,4 %	6	0	0 %
HFZ	24	4	Anticyclone sur la Fennoscandie, cyclonique	34	15	44,1 %	32	3	9,4 %
HNFA	25	4	Anticyclo. sur mer de Norvège – Fennoscandie, anticyclo.	20	14	70 %	10	0	0 %
HNFZ	26	4	Anticyclo. sur mer de Norvège – Fennoscandie, cyclo.	49	42	85,7 %	24	0	0 %
<i>Circulations de Nord-Est et d'Est</i>				192	121	63 %	76	3	3,9 %
HM	27	5	Anticyclone sur l'Europe centrale	211	121	57,3 %	52	1	1,9 %
BM	28	5	Dorsale anticyclonique sur l'Europe moyenne	251	120	47,8 %	139	3	2,2 %
TM	29	5	Dépression sur l'Europe centrale	25	15	60 %	34	6	17,6 %
<i>Centre d'action sur l'Europe centrale</i>				487	256	52,6 %	225	10	4,4 %
U	30	0	indéfini	20	6	30 %	10	0	0 %
TOTAL				2707	915	33,8 %	900	39	4,3 %

Cantar et al., 2019

Tableau 5 : Efficacité de tous les types de circulation atmosphérique (GWL) sur les gelées à Tours en hiver (A) et en avril (B) sur la Normale climatique 1981-2010, d'après la classification de Hess et Brezowsky (d'après données Météo-France et Deutscher Wetterdienst). *Impact of all types of atmospheric circulation patterns (GWL) on frost in Tours in winter (A) and in April (B) over the climate normal period 1981-2010, according to Hess and Brezowsky's classification (according to Météo-France and Deutscher Wetterdienst).*

Toutes les configurations à air froid d'altitude ne donnant pas des gelées tardives en vallée de la Loire, il convient maintenant de comprendre comment les types de temps et les facteurs géographiques d'échelle plus fine sont susceptibles de traduire le potentiel froid en gelée à l'interface air/sol.

3. L'événement gélif désastreux du 27 avril 2016 en moyenne et basse vallée de la Loire

A partir de l'exemple représentatif de la fin avril 2016, une approche géoclimatique met en évidence les relais de mécanismes allant du global au local expliquant la mise en place d'un

épisode gélif de grande ampleur sur toute la partie centrale de la France. A Tours, la gelée sous abri du 27 avril 2016 fait partie des 8 cas de température négative après le 20 avril observés en 60 ans (1959-2018), soulignant le caractère exceptionnel de la situation. La configuration synoptique (effet de dorsale à l'arrière d'un talweg) rappelle l'épisode le plus froid connu à cette période, survenu le 21 avril 1991 et qui avait également occasionné énormément de dommages dans les vignobles¹⁴.

Pour cet épisode de 2016, le bilan de la commission technique d'*InterLoire* estime la perte globale de récolte de l'ordre de 20 à 30 % (photographie 2). Les dommages sont très variables selon les secteurs, le vignoble de Touraine, du Nantais et de la Sarthe étant les plus touchés avec des communes concernées jusqu'à 80 % (site internet du magazine en ligne *Viti*). Certains évoquent le *cauchemar de 1991*, avec de nombreux témoignages faisant ressortir le rôle du contexte topographique dans l'ampleur des gelées et les pertes qui en découlent : « à Bourgueil, [...] en plaine tout a été cramé, celles des coteaux ont été moins touchées, mais 50 % de la récolte est passée à la trappe. La température est descendue jusqu'à -6 / -7°C dans les secteurs les plus gélifs ; à Saint-Nicolas-de-Bourgueil, [...] 50 à 60 % de dégâts ; à Chinon, la moitié de la récolte au moins est perdue ; les vignes de la plaine de Cravant comptent 90 % de bourgeons grillés. Celles du plateau et des coteaux sont moins touchées ; à l'est de Tours, [...] plus de 50 % des vignes ont été très touchées ; à Azay-le-Rideau, [...] 90 % de vignes touchées, 50 à 70 % à Cheillé », etc. (site internet du Vigneron du Val de Loire).



METEO

Gel dans le vignoble du Val de Loire: une perte globale de récolte de l'ordre de 20 à 30%

Publié le 27/05/2016 - 17:43 • par Viti Veille

Le gel de fin avril a fortement touché le vignoble du Val de Loire avec, sur certains secteurs, des températures minimales relevées jusqu'à -6°C. Vendredi 20 mai 2016, les professionnels du Val de Loire, réunis sous l'égide d'*InterLoire*, ont dressé un état des lieux du vignoble et défini les mesures à mettre en oeuvre.

Une estimation de perte de récolte de 20 à 30%, avec de fortes disparités

Le bilan de la commission technique d'*InterLoire*, émanant des enquêtes menées par les fédérations viticoles, les ODG et les chambres d'agriculture, estime à ce stade **une perte globale de récolte de l'ordre de 20 à 30% par rapport à une année moyenne (1.9 Million hl)**. A noter de fortes disparités selon les entreprises et les secteurs, le vignoble de Touraine, du Nantais et de la Sarthe étant les plus touchés avec des communes concernées jusqu'à 80%.

Photographie 2 : A gauche, vigne gelée le 27 avril 2016 en Val de Loire (source : Cave des Vins de Bourgueil), à droite, titre de l'article du magazine *Viti* du 27 mai 2016. *On the left, frozen vine on April 27, 2016 in the Loire Valley (source: Cave des Vins de Bourgueil), on the right, title of the Viti magazine article of May 27, 2016.*

3.1. Un préalable : la conjonction d'une masse d'air nordique et d'un type de temps clair et calme durant la nuit

L'événement du 27 avril 2016 s'inscrit dans la continuité d'une longue séquence de circulations de nord-ouest à nord (classe 3 des GWT) débutant le 18 du mois. Il apparaît conforme aux éléments d'échelle large les plus habituels pouvant potentiellement mener à une gelée tardive. Durant la semaine précédente, une circulation de nord-ouest à caractère anticyclonique (NWA) impose d'abord sur la vallée de la Loire un temps très doux et nuageux (16 à 20°C l'après-midi). Puis le 23 avril, le flux prend une composante nord cyclonique (NZ) et les conditions deviennent fraîches et instables (pas plus de 10 à 13°C dans la journée),

¹⁴ Les cartes de la situation synoptique au sol et en altitude, ainsi que les cartes de températures minimales et maximales des principales stations françaises sont disponibles en ligne sur le site de Météo-France :

Le 21 avril 1991 : https://donneespubliques.meteofrance.fr/donnees_libres/bulletins/BQA/19910421.pdf

Le 27 avril 2016 : https://donneespubliques.meteofrance.fr/donnees_libres/bulletins/BQA/20160427.pdf

toujours à dominante nébuleuse. A partir du 26 avril et jusqu'à la fin du mois, la situation est commandée par un talweg sur l'Europe centrale (TRM).

L'analyse à 500 hPa (figure 10, en haut) confirme la validité de la classification Hess-Brezowsky, avec transition d'un flux anticyclonique de nord-ouest en un flux plein nord à courbure cyclonique. Cette cartographie montre de plus la mise en place d'une poche froide remarquable pour la saison sur la Mer du Nord (température inférieure à -36°C à 500 hPa) et sa progression sur l'Europe sous l'influence de très bas géopotentiels s'étirant de la Mer de Norvège jusqu'au nord du bassin méditerranéen occidental. Cette coulée d'air arctique maritime apporte sur le nord de la France de l'air froid à toutes les altitudes, comme en attestent les radiosondages de la station aérologique de Trappes, en région parisienne, située à 100 km au nord d'Orléans (figure 10, en bas). Ainsi, entre le 22 et le 27 avril, la température chute d'environ 14°C en altitude (de -3 à -17°C à 700 hPa et de -18 à -32°C à 500 hPa). Entre le 21 et le 23 avril, l'isotherme 0 descend de 3500 m à 1000 m d'altitude environ. Le 27 avril, dans les régions soumises temporairement à un ciel clair et un vent faible comme le Val de Loire, la température nocturne près du sol peut donc facilement descendre sous 0°C , à la faveur de la formation d'inversions thermiques dans les basses couches.

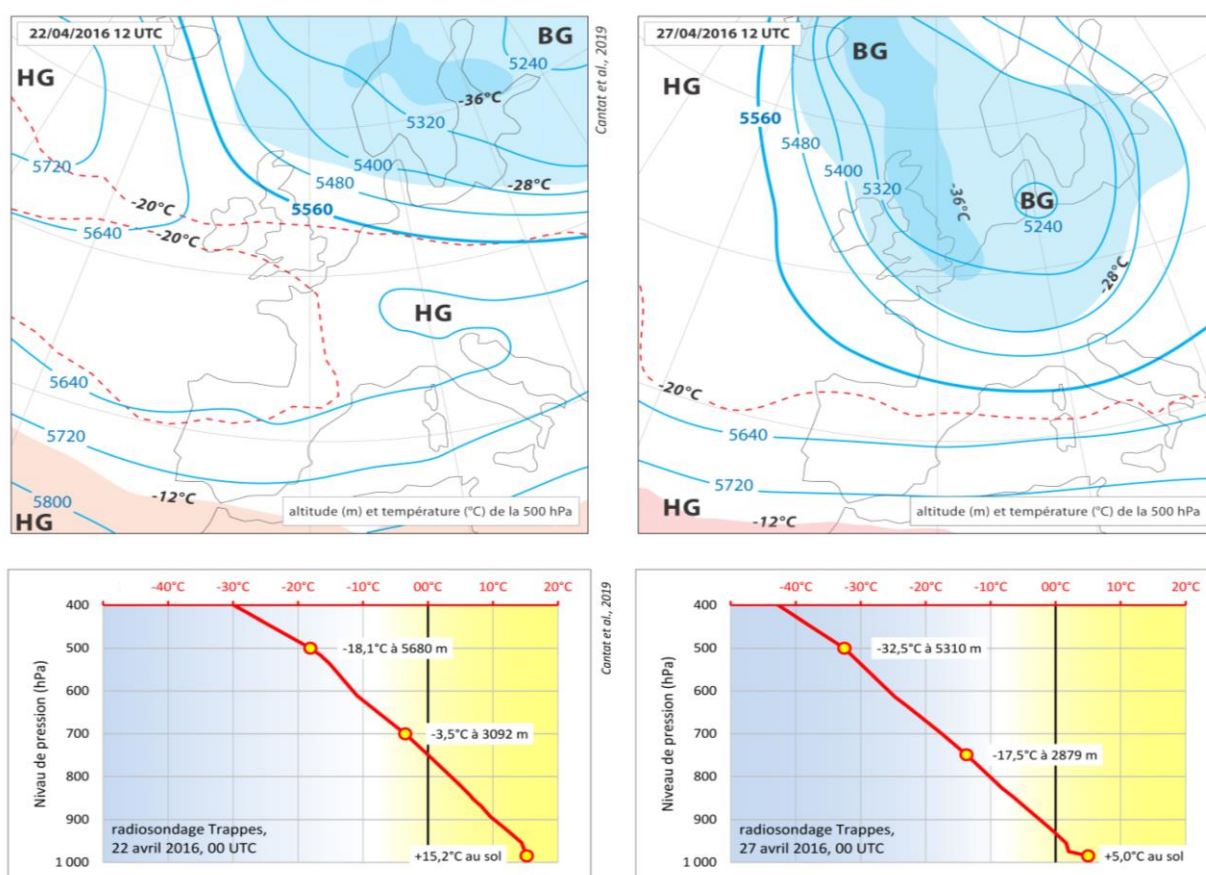


Figure 10 : Analyse à 500 hPa de la situation météorologique du 22/04/2016 et du 27/04/2016 à 12 UTC et radiosondages de Trappes en région parisienne à 00 UTC pour les mêmes dates (adaptés d'après cartes et données Météo-France). HG correspond aux zones de hauts géopotentiels (anticyclone d'altitude) et BG de bas géopotentiels (dépression d'altitude). *500 hPa analysis of the weather situation on 04/22/2016 and 04/27/2016 at 12 UTC and radiosondes of Trappes in the Paris region at 00 UTC for the same dates (adapted from maps and Météo-France data).*

Les cartes de surface et les images satellitaires permettent de caractériser plus finement la situation synoptique et d'expliquer ses conséquences en termes de types de temps à l'échelle régionale (figure 11).

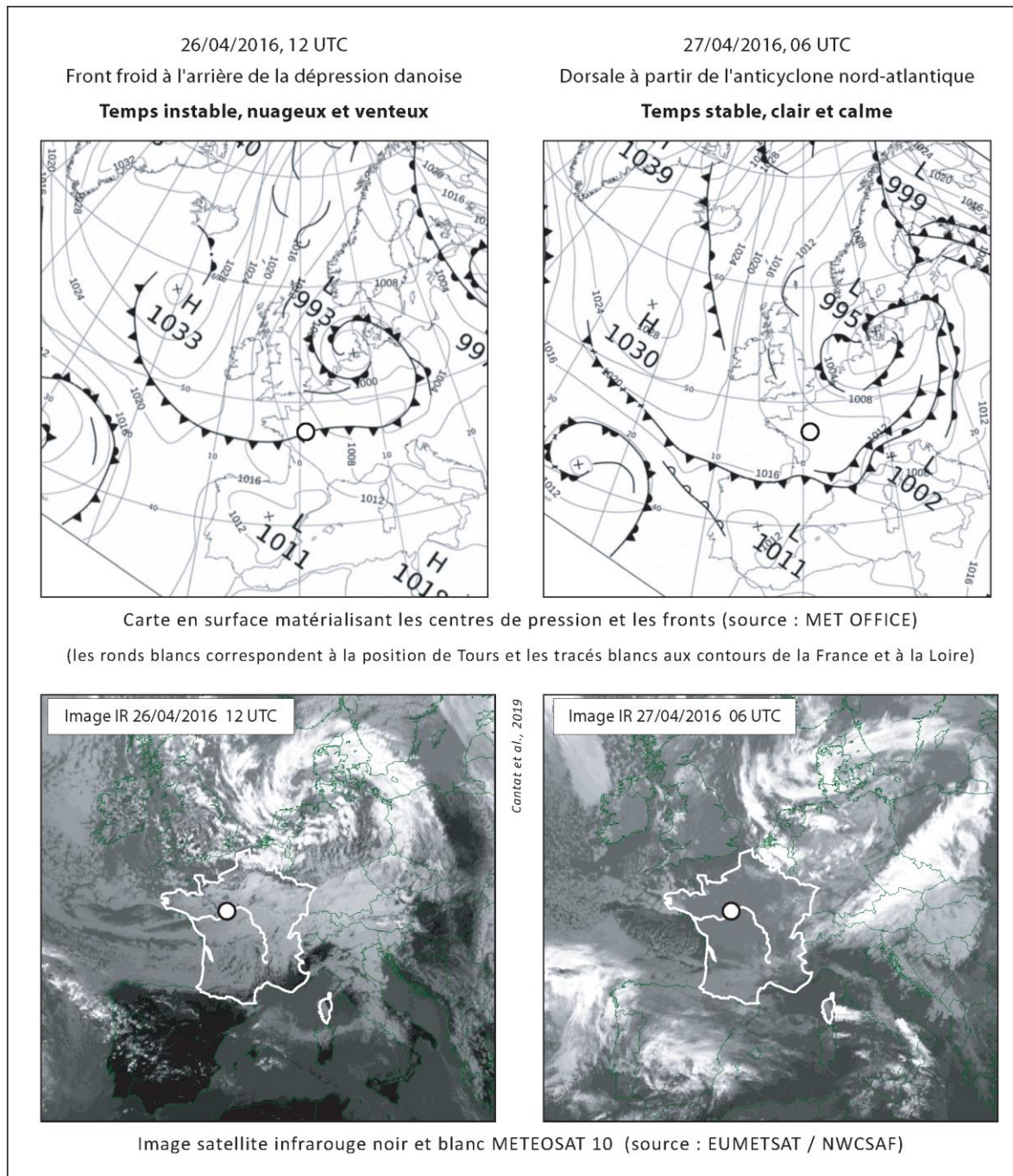


Figure 11 : Conditions météorologiques d'échelle synoptique le 26 avril 2016 à 12 h UTC et le 27 avril 2016 à 06 h UTC sur l'Europe et l'Atlantique nord (adapté d'après cartes en surface Met Office et images satellitaires Eumetsat). *Synoptic scale weather conditions on 04/26/2016 at 12 UTC and 04/27/2016 at 06 UTC over Europe and the North Atlantic (adapted from Met Office surface maps and Eumetsat satellite images).*

La présence passagère d'un temps clair et calme durant la nuit apparaît en lien avec le léger effet de dorsale progressant par l'ouest du pays et la divergence associée de l'air. Cette situation se positionne après le passage du front froid la veille et avant le retour rapide d'un autre système perturbé pluvigène incompatible avec l'apparition de gelées à cette époque de l'année.

3.2. La mise en place du froid à Tours dans la nuit du 26 au 27 avril 2016

La station de Tours, en position centrale dans le Val de Loire, sert de référence pour illustrer le déroulement des mécanismes amenant à cette gelée tardive (figure 12).

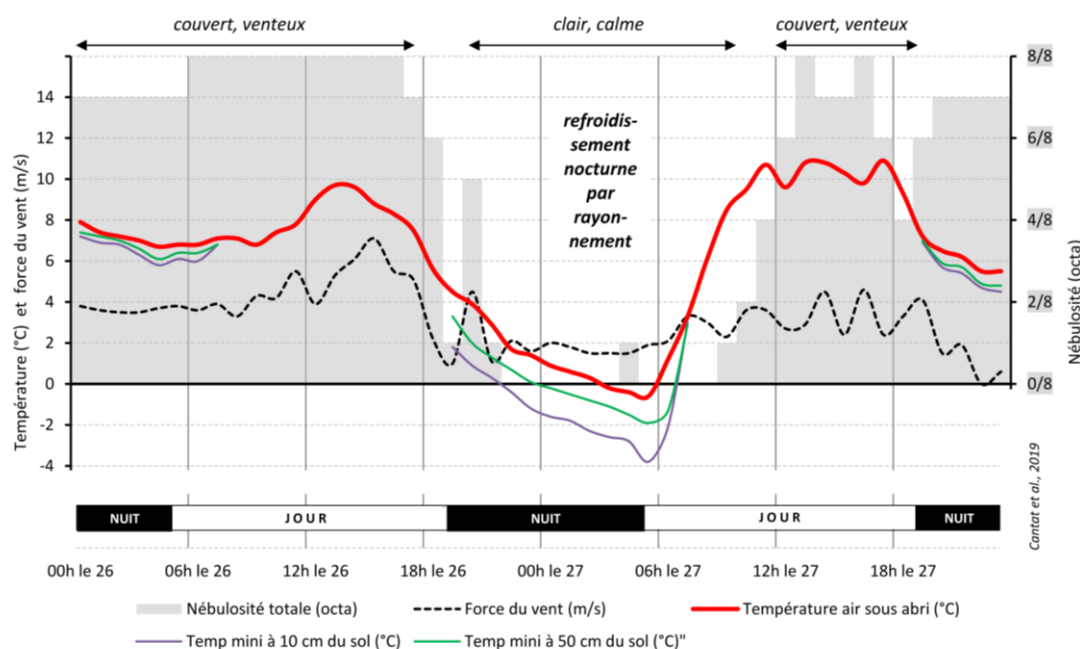


Figure 12 : Évolution horaire de la température de l'air sous abri et au-dessus du sol, de la force du vent et de la nébulosité à Tours entre le 26 avril 2016 à 00 h UTC et le 27 avril 2016 à 23 h UTC (d'après données Météo-France). *Hourly evolution of air temperature in shelter, wind strength and cloud cover at the weather station of Tours between 04/26/2016 at 00 UTC and 04/27/2016 at 23 UTC (according to Météo-France data).*

Le 26 avril, le temps est couvert (nébulosité de 7 à 8 octas), venteux (vitesse de 4 à 6 m/s) et très frais dans la journée pour cette période de l'année (température entre 7 et 10°C, soit 5°C sous la Normale climatique). En début de soirée et durant la nuit, le ciel se dégage (0 à 1 octa) et le vent fléchit nettement (moins de 2 m/s). Les deux principaux paramètres favorables au refroidissement nocturne par rayonnement étant réunis, les mécanismes opèrent pleinement. La température sous abri baisse régulièrement pour passer sous le seuil de 0°C entre 03 et 06 h UTC (minimum de -0,7°C et 187 mn de gel). A 50 cm au-dessus du sol, hauteur davantage représentative des conditions vécues par la vigne, le gel intervient plus tôt et plus fortement (entre 00 et 06 h UTC, avec un minimum de -1,9°C). Au sol (+10 cm), le refroidissement est encore plus sévère avec une valeur extrême de -3,8°C au lever du jour et une durée de gel s'étalant sur plus de neuf heures consécutives (depuis 22 h UTC la veille). Par temps clair et calme, les différences de température peuvent donc être marquées dans le plan vertical sur quelques décimètres à l'interface sol/air et occasionner des risques de gelée réels alors que la température sous abri reste faiblement positive¹⁵. Toutes les productions de plein champ de primeurs à faible développement vertical sont ainsi plus particulièrement exposées à cet aléa.

Dès 07 h UTC, sous l'effet du soleil et d'un vent un peu plus fort, la couche froide est rapidement détruite. La température remonte alors très rapidement et atteint plus de 8°C dès 09 h UTC, mais plafonne ensuite autour de 10°C toute la journée avec le retour d'une forte nébulosité et la présence d'air frais dans la masse.

3.3. Diversité spatiale des gelées sous abri observées le 27 avril 2016

La cartographie des températures minimales le 27 avril 2016 (figure 13) met en évidence des écarts considérables au sein de la vallée de la Loire, avec des postes profondément touchés par

¹⁵ Dans ces conditions, il est d'ailleurs fréquent de voir des dépôts de givre sur les objets et surfaces froides dès que la température « officielle » descend sous le seuil des +3°C sous abri météorologique (observations personnelles des auteurs).

le gel (jusqu'à -5°C en Sologne) et d'autres au contraire y échappant totalement (jusqu'à $+7^{\circ}\text{C}$ sur le littoral atlantique).

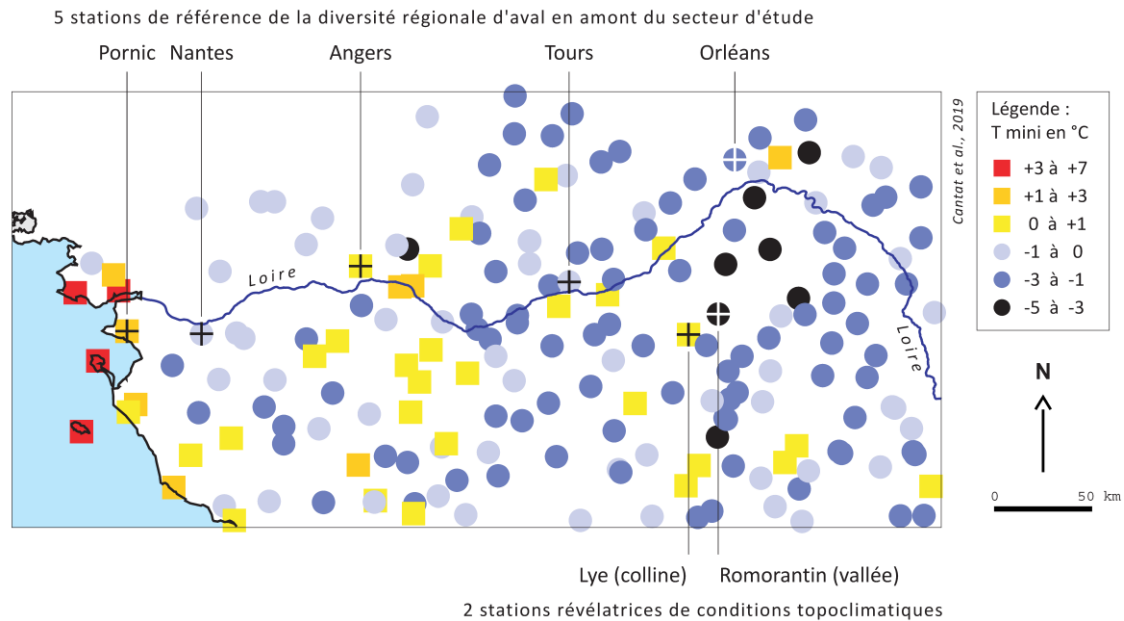


Figure 13 : Température minimale mesurée sous abri le long de la basse et de la moyenne vallée de la Loire le 27 avril 2016 (d'après données Météo-France). *Recorded minimum temperature in shelter along the lower and middle Loire Valley on 04/27/2016 (according to Météo-France data).*

Globalement, la répartition traduit les effets de la continentalité, avec une augmentation de la proportion et de l'intensité des gelées d'ouest en est. Toutefois, derrière cette organisation longitudinale logique, apparaissent des contrastes locaux marqués, comme autour d'Angers, Tours et Orléans. Ces différences thermiques observées à quelques kilomètres de distance ne sont pas imputables à des différences intra régionales dans la circulation atmosphérique, ni au type de temps qui en découle, puisque les conditions aérologiques sont identiques sur toute la vallée de la Loire en cette nuit du 27 avril 2016 (temps globalement clair et calme). Ici interviennent les facteurs géographiques locaux, éléments susceptibles de créer des différenciations spatiales conséquentes du bilan thermique nocturne. Les stations météorologiques de Romorantin et de Lye (16 km de distance), au sud-ouest de la Sologne, illustrent ces contrastes ainsi que les facteurs et processus qui en sont responsables.

3.3.1. Caractérisation de l'évolution météorologique diurne et nocturne à échelle fine

Tant que les conditions météorologiques sont perturbées (temps couvert et venteux), les deux stations présentent des températures comparables de jour comme de nuit (figure 14). La transition vers des conditions claires et calmes se produit dans la soirée du 26 avril. Mais alors qu'à Lye le refroidissement est lent et modéré (il ne gèlera pas sous abri), à Romorantin le mercure « plonge » brusquement et durablement sous la barre du 0°C (près de 6 heures de gel consécutif et un minimum de $-4,2^{\circ}\text{C}$ sous abri). Les mécanismes de formation du froid par rayonnement sont ici également très efficaces à l'interface sol/air : à 10 cm au-dessus de la surface, l'indice actino-thermique oscillera entre -5 et -7°C de 01 à 06 h UTC.

3.3.2. Explication de la différenciation thermique d'échelle fine

La station météorologique de Romorantin (figure 15), située à environ 6 km au sud-ouest de la ville, sur l'aérodrome de Pruniers, cumule un ensemble de facteurs topographiques et agropaysagers facilitant la création de nuit de froid dans les basses couches, par temps clair et calme.

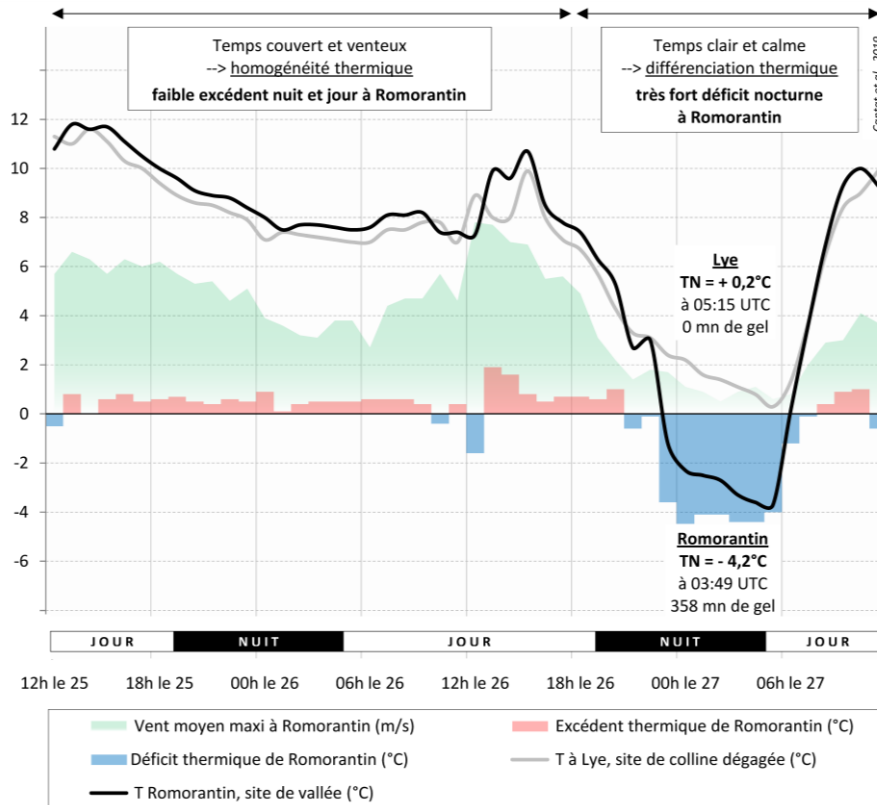


Figure 14 : Evolution horaire de la température de l'air sous abri et de la force du vent à Romorantin (vallée) et de la température de l'air sous abri à Lye (colline), entre le 25 avril 2016 à 12 UTC et le 27 avril 2016 à 11 UTC (d'après données Météo-France). *Hourly evolution of air temperature in shelter and wind speed at the weather station of Romorantin (valley floor) and the air temperature in shelter at the weather station of Lye (hilltop), between 04/25/2016 at 12 UTC and 04/27/2016 at 11 UTC (according to Météo-France data).*

L'air froid, plus dense, formé par rayonnement au contact du substratum, s'écoule par gravité et s'accumule vers le bas des deux versants de faible énergie qui dominent le replat où se trouve la station (proximité de la vallée de la Sauldre). La pellicule d'air froid a d'autant moins de mal à s'épaissir et à s'intensifier que les forêts qui encadrent le secteur suppriment les faibles mouvements d'air qui pourraient gêner la mise en place de l'inversion thermique.

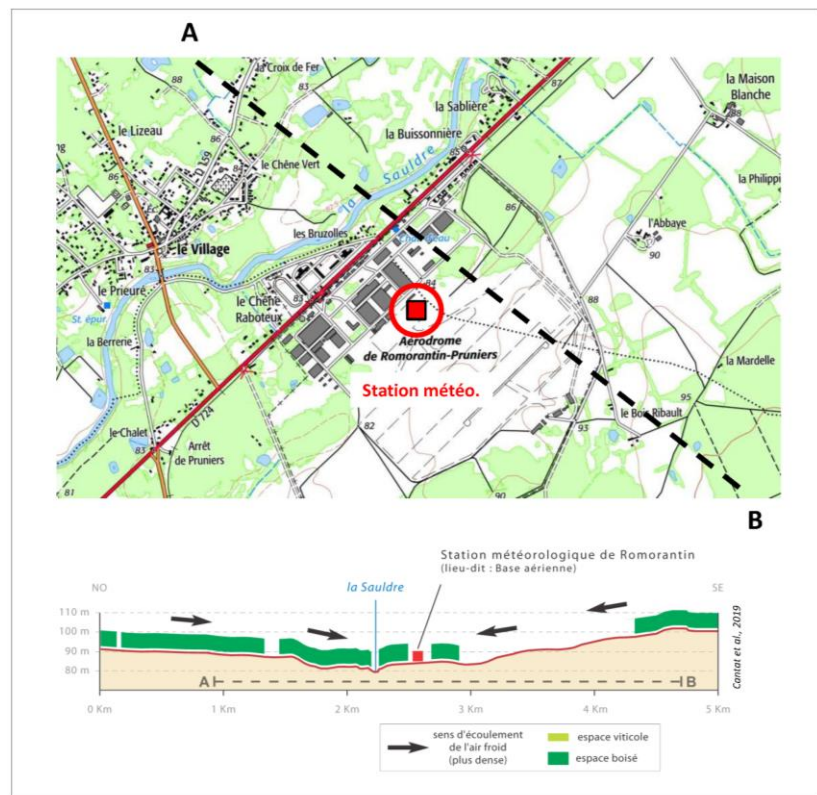
A cela s'ajoute la présence de sols sablonneux secs qui restituent très rapidement la chaleur emmagasinée durant la journée sous l'effet du soleil, comme on l'observe aussi en bordure de la forêt des Landes (Gash *et al.*, 1989 ; Pinty *et al.*, 1989)¹⁶. A Romorantin, par ce type de temps, tout concourt donc à un fort refroidissement nocturne. Ainsi, entre le milieu d'après-midi et minuit, alors que le ciel s'éclaircit et que le vent faiblit (de 7 m/s à moins de 1 m/s), la température passe de +10 à -2°C, avec une chute brutale supérieure à 4°C en une heure à 23 h UTC dont les mécanismes seraient à éclaircir par un suivi spatio-temporel à échelle très fine des écoulements d'air le long des versants.

Associées à la fréquence des types de temps clair et calme, ces caractéristiques environnementales expliquent que les gelées sont nettement plus fréquentes et intenses à Romorantin, comparativement aux stations voisines établies sur des sites plans et totalement

¹⁶ Dans la forêt des Landes (Sud-Ouest de la France), la station de Mont-de-Marsan présente des caractéristiques topoclimatiques assez semblables à celles de Romorantin, expliquant un fort surcroît de gelées par rapport aux valeurs régionales : environ 2 gelées en avril et 50 annuellement, contre 0,3 en avril et 30 à l'année dans les stations de Bordeaux, Dax ou Pau (données Météo-France sur la Normale 1981-2010).

dégagés¹⁷ : en avril, ce secteur sognot enregistre ainsi en moyenne 5,8 gelées contre seulement 2,8 à Orléans (Normale 1981-2010). Sur l'ensemble de l'année, ce sont 72 gelées à Romorantin contre environ 55 à Orléans.

Figure 15 : Localisation de la station météorologique de Romorantin (83 mètres d'altitude) avec un transect du relief et de l'occupation du sol (adapté d'après données cartographiques IGN). *Location of the weather station of Romorantin and cross section of the surroundings of Romorantin, showing its main topographic and land use features (adapted from map data IGN).*



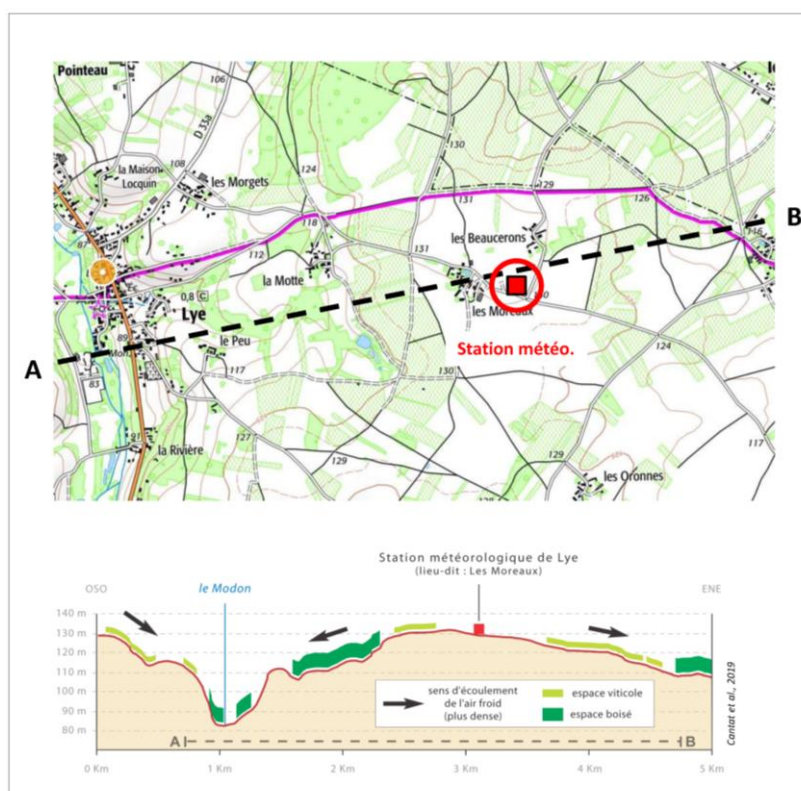
Ces particularités topoclimatiques se retrouvent jusque dans la température moyenne annuelle, environ 1°C plus faible qu'à Orléans pour les minimales (5,8 contre 6,7°C), et inversement pour les valeurs maximales qui bénéficient de l'effet d'abri et des sols sablonneux pour s'échauffer davantage en journée (16,7 contre 15,8°C et 60,6 jours de chaleur contre 49,6), ce qui profite notamment au cépage rustique *Romorantin* développé sur les sols maigres avec présence plus importante de sables en surface, du côté de Cour-Cheverny, au nord-ouest de la station.

A Lye (figure 16), le profil topographique est inversé par rapport à celui de Romorantin. Le froid créé par rayonnement nocturne descend par gravité le long des pentes qui divergent depuis le sommet de la colline où est située la station. Ici, aucune barrière naturelle (bois ou haies) ne vient bloquer son écoulement vers les talwegs, comme celui occupé par la rivière Modon trois kilomètres à l'ouest. Ceci explique les gelées printanières très rares sur les collines semblables à celle du lieu-dit *Les Moreaux* (1 en moyenne en avril), contrairement aux fonds de vallées et/ou secteurs de convergence topographique abrités du vent (près de 6 en moyenne à Romorantin).

¹⁷ Sur la Normale 1981-2010, les températures minimales extrêmes (TNN) sont à Romorantin de -6,5°C pour le mois d'avril (9/4/2003) et de -20,9°C pour l'année (17/1/1985), contre des valeurs extrêmes de -4,3°C (12/4/1986) et de -18,2°C (17/1/1985) à Orléans. Ce qui est vrai à l'échelle de la section Est de la zone d'étude l'est *a fortiori* encore davantage plus en aval où l'océanité modère le froid. D'Ouest en Est, voici sur la Normale 1981-2010 les TNN du mois d'avril et de l'année pour les autres stations référence à site normalisé (aéroport/aérodrome) de cette étude : -2,8°C/-13,0°C à Nantes ; -3,4°C/-15,4°C à Angers ; -3,4°C/-17,4°C à Tours.

L'influence du type de circulation atmosphérique et de la dynamique des masses d'air, de la topographie, des caractéristiques environnementales et les différents degrés de tolérance/vulnérabilité de la vigne font que les dommages liés au gel printanier sont très variables sur des espaces relativement restreints (Cellier, 1989 ; Quénot, 2002). Plus précisément, la topographie et la présence de végétation « coupe-vent » favorisant la formation de « lacs d'air froid » constituent les principaux éléments d'explication dans la géographie contrastée à échelle fine des gelées par temps clair et calme (Geiger, 1966 ; Oke, 1978 ; Escourrou, 1981 ; Beltrando, 1998 ; Quénot, 2002 ; Cantat, 2015). Les viticulteurs comme les arboriculteurs connaissent d'ailleurs bien les effets des particularités géographiques sur les températures nocturnes et évitent les bas de versant pour leurs cultures (Madelin, 2004 ; Rouvellac, 2013)¹⁸.

Figure 16 : Localisation de la station météorologique de Lye (130 mètres d'altitude) avec un transect du relief et de l'occupation du sol (adapté d'après données cartographiques IGN). *Location of the weather station of Lye and cross section of the surroundings of Lye, showing its main topographic and land use features (adapted from map data IGN).*



En somme, malgré l'indigence des dénivelés propres à la moyenne et basse vallée de la Loire, les modelés en creux entraînent des inversions thermiques nocturnes potentiellement nuisibles aux cultures, à l'instar des phénomènes observés en montagne, entre le confinement de l'air dans les vallées et la plus libre circulation de celui-ci sur les versants et plus encore autour des sommets (Escourrou, 1981).

Discussion

En avril, si des masses d'air nordique parviennent assez fréquemment sur l'Europe occidentale, elles ne sont plus suffisamment froides pour observer une isotherme 0°C au niveau de la plaine, comme cela peut être le cas en hiver lors de décrochements polaires. Cette condition nécessaire d'échelle synoptique doit alors être relayée à l'échelle régionale par l'établissement d'un type de temps clair et calme – au moins durant une nuit – pour parvenir

¹⁸ A ces caractéristiques s'ajoute la nature moins drainante et plus humide des bas de versants et des talwegs qui contrarie le développement de ces végétaux.

jusqu'au seuil du gel dans les très basses couches de l'atmosphère. Les cas sont rares car cette concomitance est difficile à obtenir : en effet, l'air froid modéré amené à cette saison dans le sillage des bas géopotentiels s'accompagne généralement d'un temps instable, couvert et venteux, donc incompatible avec la formation nocturne d'une inversion thermique. On peut toutefois observer ces conditions simultanément lors des phases de transition entre l'évacuation de la poche froide initiale d'origine polaire et l'arrivée d'une masse d'air plus doux, correspondant à l'avancée par l'ouest de hauts géopotentiels et d'une dorsale anticyclonique. En cas de blocage ou de déplacement très lent de ces deux acteurs météorologiques, le froid hérité de l'épisode nordique antérieur et la stabilité apportée par la proximité des hautes pressions peut alors engendrer un type de temps favorable à la succession de plusieurs gelées tardives. Les risques restent toutefois limités car les processus de refroidissement par rayonnement sont amoindris du fait des nuits beaucoup plus courtes qu'en hiver¹⁹ et de sols déjà bien réchauffés à cette période de l'année.

Lorsque les conditions d'échelle synoptique sont réunies, les gelées sont possibles sur l'ensemble de la région mais leurs intensités et leurs durées sont alors commandées par les facteurs géographiques locaux (topographie, mode d'occupation et nature des sols). Tous les éléments contribuant à la stagnation de l'air près de la surface deviennent alors des facteurs aggravants (Quénol, 2002), comme le montrent clairement les effets de site de la station de Romorantin²⁰. De ce fait, dans les secteurs à risques constitués par la topographie (creux) et les effets d'abri induits par la végétation (haies, bois), les gelées tardives peuvent se produire dans des contextes synoptiques plus nombreux et variés que sur les terrains dégagés où le moindre souffle de vent limite, voire empêche la formation de l'indispensable inversion thermique nocturne pour atteindre le seuil de 0°C. Ainsi, à Romorantin, en avril, le gel est possible lors des flux d'ouest (17 cas en 30 ans, soit environ 10 % des gelées tardives), alors que cela revêt un caractère très exceptionnel à Orléans (1 cas en 30 ans) (figure 17).

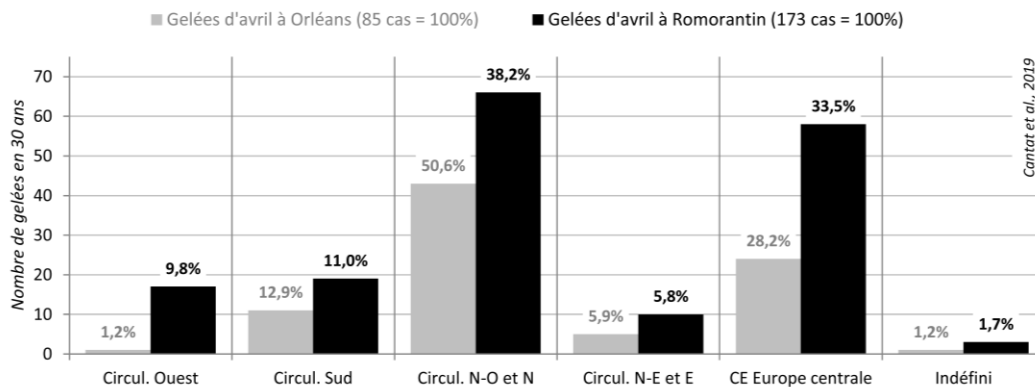


Figure 17 : Comparaison de la fréquence et du pourcentage relatif des gelées en avril à Romorantin et Orléans sur la Normale climatique 1981-2010, en fonction des 5 classes de circulation atmosphérique, d'après la classification de Hess et Brezowsky (d'après données Météo-France et Deutscher Wetterdienst). *Comparison of the frequency and relative percentage of frosts in April in Romorantin and Orléans over the climate normal period 1981-2010, according to the 5 classes of atmospheric circulation patterns, according to the classification of Hess and Brezowsky (according to Météo-France data and Deutscher Wetterdienst).*

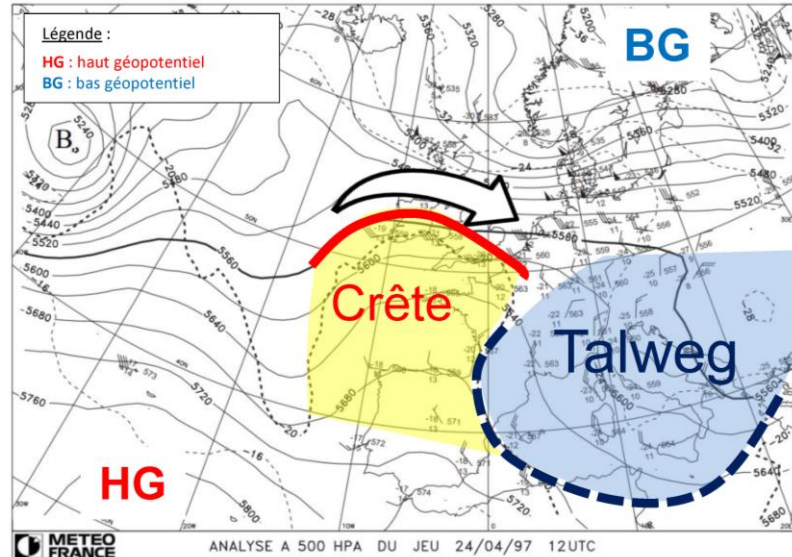
En analysant chaque journée de gel lié à cette dynamique d'ouest, on remarque que 13 événements sur les 17 (76 %) sont intervenus lors de courbure cyclonique du flux, mais que les

¹⁹ A cette latitude en avril, la phase nocturne est de l'ordre de 10 à 11 heures, contre plus de 15 heures fin décembre.

²⁰ Sur la Normale 1981-2010, la vitesse moyenne du vent est 15,1 km/h sur le site dégagé de la station d'Orléans, contre 9,4 km/h sur le site abrité de Romorantin. Par an, les rafales supérieures à 58 km/h (16 m/s), sont au nombre de 49,7 à Orléans et seulement de 28,6 à Romorantin.

2 plus marqués se sont produits par courbure anticyclonique, lors d'une série remarquable de 3 jours consécutifs en avril 1997 : $-5,5^{\circ}\text{C}$ le 23 ; $-4,7^{\circ}\text{C}$ le 24 ; $-1,6^{\circ}\text{C}$ le 25. Dans le même temps, il n'a pas gelé sur le site régional de référence de la station d'Orléans. Pour expliquer cette configuration très inattendue (figure 18), le flux d'ouest anticyclonique s'inscrivait dans l'amorce d'une crête chaude en progression depuis l'Atlantique.

Figure 18 : Analyse à 500 hPa de la situation du 24 avril 1997 à 12 UTC (adapté d'après données Météo-France). *500 hPa analysis of the weather situation of 04/24/1997 at 12 UTC (adapted from Météo-France data).*



Celle-ci venait prendre la place d'un vaste talweg chargé d'air froid s'évacuant lentement sur la Méditerranée, dont les effets thermiques encore présents permettaient de garder un potentiel de gelée tardive. Pour comprendre les forts écarts de température à peu de distance, le temps étant clair sur toute la région, c'est le vent qui différenciait les secteurs : la formation d'une inversion thermique conséquente était possible à Romorantin (air totalement calme en fin de nuit), alors que sur Orléans, un léger vent (environ 2 m/s) et probablement l'inertie thermique des sols plus forte que sur les couvertures sablonneuses solognotes empêchaient au phénomène de prendre de l'ampleur, expliquant les 5 à 6°C de plus durant ces 3 jours sur les températures minimales.

Conclusion

En vallée de la Loire, les gelées tardives sont rares car elles sont la résultante d'un système avec emboîtement des échelles spatiales – du domaniale (types de circulation) au local (facteurs géographiques), en passant par le régional (types de temps) – et des échelles temporelles (durée minimum d'action du phasage de tous les processus contribuant au refroidissement nocturne). Si le phénomène gélif survient, même avec une faible intensité et sur une courte durée, il explique des impacts importants sur la vigne car au printemps, l'avancée des stades phénologiques rend les plants physiologiquement très vulnérables.

En règle générale, en avril, la gelée apparaît sous la dépendance initiale d'un contexte synoptique sur l'Europe de l'Ouest caractérisé par la présence d'une masse d'air froid à tous les niveaux d'altitude, associée à de bas géopotentiels d'origine polaire. Ceci différencie les gelées printanières des gelées hivernales qui, elles, interviennent sur un spectre beaucoup plus large et majoritairement lors de situations anticycloniques dynamiques (la longueur de la nuit accentuant le refroidissement radiatif, ce qui compense l'absence de froid sur-jacent). En somme, si le gel d'hiver peut se passer de la présence de froid sur toute l'épaisseur de la masse d'air, ce n'est plus le cas en avril.

Par ailleurs, l'anticipation des périodes à risque gélif printanier pour la viticulture doit s'étendre à des situations synoptiques moins attendues – nous l'avons démontré avec les gelées par flux d'ouest à Romorantin – dès lors que l'environnement des vignobles ne répond pas aux critères d'une station de référence (site plan et dégagé). Cet exemple rappelle que si la normalisation des conditions environnementales est une nécessité pour la météorologie et la climatologie générale (Leroy et Lafaysse, 1993), en revanche, en géoclimatologie, il convient d'enrichir l'analyse par des stations représentatives de la diversité réelle des caractéristiques géographiques locales des espaces étudiés (topographie, occupation du sol, nature du sol) (Cantat et Brunet, 2001), voire d'implanter son propre réseau de mesures (Quénol *et al.*, 2014).

Enfin, toutes les études montrent que le réchauffement climatique contemporain constitue déjà un élément perturbateur dans les écosystèmes en avançant les stades phénologiques des plantes (Menzel et Fabian, 1999 ; Jones et Davis, 2000 ; Chmielewski et Rötzer, 2002 ; Duchêne et Schneider 2005 ; Chmielewski, 2007 ; Augustin et Erasmi, 2008 ; Madelin *et al.*, 2008 ; Quénol, 2014). Si les gelées sont moins nombreuses et moins intenses qu'au cours des précédentes décennies, le risque est toujours présent, même très tard dans la saison²¹. En conséquence, les vignes apparaissent davantage exposées aux effets des gels tardifs en raison de l'avancement des stades phénologiques, à l'image des dégâts subis dans le Pays nantais le 4 avril 2019 et des moyens pour lutter contre le gel (brassage de l'air et enfumage des vignobles) mis en œuvre – d'efficacité variable – jusque début mai dans certains vignobles de Touraine et ailleurs en France.

Pour les prochaines décennies, la question se pose donc maintenant quant à l'évolution de la fréquence/intensité des gelées et surtout de la date d'occurrence des derniers événements gélifs à fort impact sur les vignobles. Ainsi, pour compléter ce travail réalisé pour la période contemporaine, l'étude sera prochainement étendue aux conditions futures que pourrait rencontrer la vigne dans la suite de ce 21^{ème} siècle. En s'appuyant sur les projections climatiques issues de différents scénarios RCP du GIEC (IPCC, 2013), il est probable que les gelées ne se produisent plus en avril dans les décennies à venir, notamment dans l'optique d'une poursuite sur le rythme actuel des émissions de gaz à effet de serre (scénario RCP 8,5). Pour autant, cela ne veut pas dire que les vignobles ne seraient plus touchés par les effets du gel car l'élévation d'environ 3°C des températures au printemps dans le Val de Loire provoquerait un avancement des stades phénologiques, conduisant à une sensibilité au gel reporté sur les mois précédents qui, eux, pourraient encore subir cet aléa.

Au-delà des grandes lignes directrices sur les conditions futures – dont on pressent fortement les contours (climat plus chaud et phénologie plus précoce) – ce questionnement renvoie également aux incertitudes des modèles dans la projection de la variabilité des types de circulation et des types de temps dont les phénomènes extrêmes dépendent. Ces liens complexes font déjà l'objet de nombreuses études qui, compte tenu des très forts enjeux actuels et futurs, sont appelées à se développer davantage encore à l'avenir, par exemple en Europe (Kyselý et Huth, 2006 ; Cahynová et Huth, 2009a-b ; Werner et Gerstengarbe, 2011 ; Belleflamme *et al.*, 2012 ; Xoplaki *et al.*, 2012 ; Molitor *et al.*, 2014 ; García-Valero *et al.*, 2015).

Pour envisager globalement l'avenir de la viticulture sous climat océanique tempéré, il conviendra aussi d'associer aux gelées tardives l'évolution des phénomènes extrêmes en période chaude susceptibles de nuire au bon développement des plants de vigne. Canicules, sécheresses et chutes de grêle sont en effet des aléas qui pourraient devenir plus fréquents et récurrents dans les prochaines décennies (IPCC, 2013), à l'image de l'épisode de très forte

²¹ En 2019, dernière gelée le 6 mai pour Angers, Tours et Orléans ; le 16 mai à Romorantin (-0,8°C).

chaleur de juillet 2019 en Europe occidentale avec plus de 40°C sous abri²² qui a dans certains vignobles brûlé des grappes de raisins (Agreste, 2019)²³.

Références bibliographiques

Agreste, 2019. Infos rapides. *Viticulture*, août 2019, n° 2019-120.

<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/IraVit19120/detail/>

Augspurger C. K., 2009. Spring 2007 warmth and frost: phenology, damage and refoliation in a temperate deciduous forest. *Funct. Ecol.*, 23, 1031-1039. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01587.x>

Augspurger C. K., 2013. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. *Ecology*, 94, 41-50.

<https://doi.org/10.1890/12-0200.1>

Augustin J., Erasmi S., 2008. Klimawandel – Apfelblüte macht das Regionalklima sichtbar. *NAD aktuell 5*, Leipzig : Leibniz-Institut für Länderkunde, 3 p. + 3 graphiques et 4 cartes. http://aktuell.nationalatlas.de/Klimawandel.5_05-2008.0.html/

Barbeau G., 2007. *Climat et vigne en moyenne vallée de la Loire, France*. Congrès sur le climat et la viticulture, Saragosse, Espagne, 10-14 avril, seconde session « climat et terroir », 96-101. <https://prodinra.inra.fr/?locale=fr#!ConsultNotice:22836>

Barbeau G., Neethling E., Ollat N., Quenol H., Touzard J.-M., 2015. Adaptation au changement climatique en agronomie viticole. *Revue AE&S*, 5, 1, 9 p. [En ligne](#).

Bárdossy A., Caspary H. J., 1990. Detection of climate change in Europe by analysing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 155-167. <https://doi.org/10.1007/BF00866871>

Belleflamme A., Fettweis X., Ericum M., 2012. Les modèles globaux projettent-ils plus de blocages anticycloniques en Europe pour le futur ? *Actes du 25^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Grenoble, 99-104. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/130575>

Beltrando G., 1998. Les gelées printanières en Champagne viticole. Quelques résultats obtenus à partir d'un nouveau réseau de stations automatiques. *La Météorologie*, 21, 30-42.

<https://doi.org/10.4267/2042/47040>

Bigler C., Bugmann H., 2018. Climate induced shifts in leaf unfolding and frost risk of European trees and shrubs. *Scientific Reports* 8(9865), 10 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27893-1>

Bloesch B. et Viret O., 2008. Stades phénologiques repères de la vigne. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.*, 40 (6), I-IV. http://www.agrometeo.ch/sites/default/files/documents/stades_pheno_vigne.pdf

²² Le 25 juillet 2019, en remontant le long de la vallée de la Loire, à partir de l'Anjou les températures maximales dépassaient 40°C (38,8°C à Nantes ; 40,7°C à Angers ; 40,8°C à Tours ; 41,3°C à Orléans pour nos stations de référence). Elles atteignaient même localement plus de 42°C du Saumurois à la Touraine (42,3°C à Saumur ; 42,5°C à Cheillé et Lignières-de-Touraine ; 43,0°C à Chinon) et dans l'Orléanais (42,0°C à la station INRA d'Orléans et 42,9°C à St-Benoît-sur-Loire). A noter que les bords de l'Océan Atlantique ne furent pas épargnés par les très fortes chaleurs (maximum $\geq 35^\circ\text{C}$) puisqu'on notait 36,9°C à St-Nazaire et 37,5°C à Pornic.

²³ ...même s'il convient de relativiser ces pertes liées aussi à des traitements phytosanitaires maladroits (note du relecteur).

- Bonnefoy C., Quenol H., Planchon O., Barbeau G., 2010. Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo* [En ligne], numéro 14 | 2010, <https://doi.org/10.4000/echogeo.12146>
- Bonnefoy C., Quenol H., Bonnardot V., Barbeau G., Madelin M., Planchon O., Neethling E., 2012. Temporal and Spatial Analysis of Temperatures in a French wine-producing area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*, <https://doi.org/10.1002/joc.3552>
- Bonnefoy C., Madelin M., Quénol H., 2014. Modélisation spatiale des températures dans le vignoble des coteaux du Layon. *Revue Internationale de Géomatique*, 24/3, 377-400. <https://doi.org/10.3166/rig.24.377-400>
- Briche É., Quenol H., Beltrando G., 2011. Changement climatique dans le vignoble champenois L'année 2003, préfigure-t-elle les prévisions des modèles numériques pour le XXI^e siècle ? *L'Espace géographique*, 2011/2(40), 164-175. <https://doi.org/10.3917/eg.402.0164>
- Cahynová M., Huth R., 2009a. Enhanced lifetime of atmospheric circulation types over Europe: fact or fiction? *Tellus*, 61A, 407-416. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2009.00393.x>
- Cahynová M., Huth R., 2009b. Changes of atmospheric circulation in Central Europe and their influence on climatic trends in the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, 57-68. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0097-2>
- Cantat O., Brunet L., 2001. Discontinuité géographique et particularités climatiques en Basse-Normandie. *Annales de Géographie*, 622, 579-596. <https://doi.org/10.3406/geo.2001.1703>
- Cantat O., 2015. *Proposition méthodologique pour une approche globale et objective des types de temps en France métropolitaine. Étude de climatologie physiologique et appliquée*. HDR, Vol. 3, Université Paris 7 Diderot, 264 p.
- Carrega P., 2003. Le climat aux échelles fines. *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, 15, 19-30. http://www.climato.be/aic/colloques/actes/PubAIC/art_2003_voll5/Article_1_P_Carrega.pdf
- Castel T., Lecomte C., Richard Y., Lejeune-Hénaut I., Larmure A., 2017. Frost stress evolution and winter pea ideotype in the context of climate warming at a regional scale. *OCL*, 1, D106. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017002>
- Cellier P., 1989.: Mécanismes du refroidissement nocturne : application à la prévision des gelées de printemps. In *Le gel en agriculture*, INRA, 145-164. <https://prodinra.inra.fr/record/102417>
- Chamberlain C. J., Cook B. I., García De Cortázar-Atauri I., Wolkovich E. M., 2019. Rethinking false spring risk. *Global Change Biology*, 25(7), 2209-2220. <https://doi.org/10.1111/gcb.14642>
- Chmielewski F.-M., 2007. Phänologie – ein Indikator zur Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre. In: Behr, H.D. (Ed.) : *Phänologie*, Deutscher Wetterdienst : Promet, 33. Jahrgang, Heft 1/2, 28-35. https://rcc.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_promet/pdf_promethefte/33_1_2_pdf.pdf
- Chmielewski F.-M., Rötzer T., 2002. Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Climate Research*, 19, 257-264. <https://doi.org/10.3354/cr019257>
- Choisnel E., Payen D., 1988. Les climats de la France. *Supplément de La Recherche*, 201, 32-41.
- Christner B. C., Cai R., Morris C. E., Mccarter K. S., Foreman C. M., Skidmore M. L., Montross S. N., Sands D. C., 2008. Geographic, seasonal, and precipitation chemistry influence on the abundance and activity of biological ice nucleators in rain and snow. *Proceedings of the National Academy, Environmental Sciences*, 105, 18854-18859. <https://doi.org/10.1073/pnas.0809816105>

- Cochard H., Lemoine D., Ameglio T., Granier A., 2001. Mechanism of xylem recovery from winter embolism in *Fagus sylvatica*. *Tree Physiol.*, 21, 27-33. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.1.27>
- CRC, 1985. Cartographie des climats de la France (document papier consultable au CRC, Dijon).
- De Brouwer M., 2016. *Les gelées dans les vignobles belges et voisins, quelles mesures de protection ?* Site des amateurs de vignes et de vins de fruits dans les régions septentrionales, dossier « protection gelées », 10 p., http://www.vignes.be/dossier_protection_gelées.pdf
- De Resseguier L., Petitjean T., Van Leeuwen C., 2018. Variabilité de la température durant les nuits de gel du mois d'avril 2017 - Région viticole de Pomerol, Saint-Emilion et leurs satellites. https://www.adviclim.eu/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-12_Article-Gel-Bordeaux1.pdf
- Douguedroit A., 2004. Quelle exception française en matière de « types de temps » ? *Norois*, 191, 33-39. <https://doi.org/10.4000/norois.1017>
- Duchêne E., Schneider C., 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace, *Agronomy for Sustainable Development*, 25, 93-99. <http://doi.org/10.1051/agro:2004057>, <https://prodinra.inra.fr/?locale=fr#!ConsultNotice:12437>
- Escourrou G., 1978. *Climatologie pratique*. Masson, Paris, 172 p.
- Escourrou G., 1981. *Climat et Environnement. Les facteurs locaux du climat*, Masson, Paris, 182 p.
- Estrella N., Sparks T. H., Menzel A., 2007. Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology*, 13, 1737-1747. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01374.x>
- Fallot J.-M., 2000. Évolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Suisse durant le 20^e siècle. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13, 100-109.
- Fuller M. P., Telli G., 1999. An investigation of the frost hardiness of grapevine (*Vitis vinifera*) during bud break. *Annals of Applied Biology*, 135, 589-595. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1999.tb00891.x>
- García-Valero J. A., Montávez J. P., Gómez-Navarro J. J., Jiménez-Guerrero P., 2015. Attributing trends in extremely hot days to changes in atmospheric dynamics. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 2143-2159. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2143-2015>
- García De Cortázar-Atauri I., Brisson N., Gaudillere J.-P., 2009. Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *International Journal of Biometeorology*, 53, 317-326. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0217-4>
- Gash J. H. C., Lloyd W. J., André C. R., Goutorbe J.-C., Gelpe J. H. C., 1989. Micrometeorological measurements in Les Landes forest during HAPEX-MOBILHY. *Agric. For. Meteorol.*, 46, 131-147. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90117-2)
- Gavrilescu C., Bois B., Castel T., Larmure A., Ouvrie M., Richard Y., 2019. *Analyse spatiale de l'évolution du risque de gel sur la vigne en Bourgogne-Franche-Comté*. Actes du 32^{ème} colloque l'Association Internationale de Climatologie, Thessalonique, 181-185. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02189405/>
- Geiger R., 1966. *The Climate near the ground*. Harvard University Press, Cambridge, MA, 611 p. <https://doi.org/10.1016/0016-0032%2866%2990072-X>

- Gerstengarbe F. W., Werner P. C., 2005 : *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky*. PIK Report, 100, 153 p. <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr100.pdf>
- Gu L., Hanson P. J., Mac Post W., Kaiser D. P., Yang B., Nemani R., Pallardy S. G., Meyers T., 2008. The 2007 eastern US spring freeze: Increased cold damage in a warming world? *BioScience*, 58, 253-262. <https://doi.org/10.1641/B580311>
- Hänninen H., 1991. Does climatic warming increase the risk of frost damage in northern trees. *Plant, Cell & Environment*, 14, 449-454. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01514.x>
- Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K., 2010. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48 (4), 29 p. <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>
- Hess P., Brezowsky H., 1952. *Katalog der Grosswetterlagen Europas*. Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, 33, 39 p.
- Hufkens K., Friedl M. A., Keenan T. F., Sonnentag O., Bailey A., O'Keefe J., Richardson A. D., 2012. Ecological impacts of a widespread frost event following early spring leaf-out. *Global Change Biology*, 18, 2365-2377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02712.x>
- IFV (Institut français de la vigne et du vin), 2018. aléas climatiques de la vigne. La grêle et le gel de printemps : comment s'en protéger ? *Cahier Itinéraire*, 27, 36 p. https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/Cahier_Itineraire_n_27_-_Gel_et_Grele_-_VF_BD-1.pdf
- IPCC, 2013. *Summary for Policymakers*. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Itier B., Flura D., Brun O., Luisetti J., Gaignard J.-L., Choisy C., Lemoine G., 1991. Analyse de la gélivité des bourgeons de vigne. Expérimentation in situ sur le vignole champenois, *Agronomie*, 11, 169-174. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885362/>
- James P. M., 2007. An objective classification for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 88, 17-42. <https://doi.org/10.1007/00704-006-0239-3>.
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M. et Wavreskyjoly P., 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Cartographie, Imagerie, SIG, document 501, mis en ligne le 18 juin 2010. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155>
- Jones G. V., Davis R. E., 2000. Climate influences on grapevine phenology, grape composition and wine production and quality for Bordeaux, France, *Am. J. Enol. Vitic.*, 51(3) 249-261. <https://www.ajeonline.org/content/51/3/249>
- Jones P. D., Lister D. H., Orborn T. J., Harpham C., Salmon M., Morice C. P., 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research*, 117 (D5), 29 p. <https://doi.org/10.1029/2011JD017139>
- Kistner E., Kellner O., Andresen J., Todey D., Morton L.W., 2018. Vulnerability of specialty crops to short-term climatic variability and adaptation strategies in the Midwestern USA. *Clim. Change*, 146, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2066-1>

- Köppen W., 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geogr. Zeitschrift*, 6, S. 593-611 & S. 657-679.
http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1900.pdf
- Kreyling J., Stahlmann R., Beierkuhnlein C., 2012. Räumliche Variation in der Blattschädigung von Waldbäumen nach dem extremen Spätfrostereignis im Mai 2011 (Spatial variation in leaf damage of forest trees after the extreme spring frost event in May 2011). *Allgemeine Forst- und Jagd- Zeitung*, 183(1&2), 15-22, <https://www.sauerlaender-verlag.com/allgemeine-forst-und-jagdzeitung-2012-2/#>
- Kührer E., 2017. Der Spätfrost 2016 in Niederösterreich, Erfahrungen und Lehren. *Der Winzer* (Frost-Themen), 02, 84-87. https://www.lako.at/de/versuche/inc/modules/lako_versuche/pdf/weinbau_neu/2016/spaetfrost_krems_2016.pdf
- Kysely J., Huth R., 2006. Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 85, 19-36.
<https://doi.org/10.1007/s00704-005-0164-x>
- Leroy M., 1999. *Classification d'un site*, Note technique, N°35, DSO, Météo-France, 12 p.
<http://meteo.besse83.free.fr/imfix/35-1999.pdf>
- Leroy M., Lafaysse C., 1993. *Recommandations pour l'implantation et l'aménagement des parcs météorologiques*. Note technique, N°31, DSO, Météo-France, 10 p.
- Liu Q., Piao S., Janssens I.A., Fu Y., Peng S., Lian X., Ciais P., Myneni R.B., Peñuelas J., Wang T., 2018. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. *Nature Communications*, 9(426), 8 p. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02690-y>
- Luisetti J., Gaignard J.-L., Devaux M., 1991. *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* as one of the Factors affecting the ice nucleation of grapevine buds in controlled conditions. *Journal of Phytopathology*, 133, 334-344. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1991.tb00169.x>
- Madelin M., 2004 : *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : modélisations spatiales aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VII, UMR Géographie-cité et UMR Prodig, 412 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008906>
- Madelin M., Chabin J.-P., Bonnefoy C., 2008. Global warming and its consequences on the Beaune vineyards. *Enometrica*, 1(2), 9-19.
- Marino G. P., Kaiser D. P., Gu L., Ricciuto D. M., 2011. Reconstruction of false spring occurrences over the southeastern United States, 1901–2007: an increasing risk of spring freeze damage? *Environ Res. Lett.*, 6, 024015, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/024015>
- Martin M., Gavazov K., Körner C., Hättenschwiler S., Rixen C., 2010. Reduced early growing season freezing resistance in alpine treeline plants under elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 16, 1057-1070.
- Mayr S., Cocahrd H., Ameglio T., Kikuta S. B., 2007. Embolism formation during freezing in the wood of *Picea abies*. *Plant Physiol.*, 143, 60–67. <https://doi.org/10.1104/pp.106.085704>
- Mcintyre G. N., Lider L. A., Ferrari N. L., 1982. The chronological classification of grapevine phenology. *American Journal of Enology and Viticulture*, 33, 80-85.
<https://www.ajevonline.org/content/33/2/80>

- Marino G. P., Kaiser D. P., Gu L., Ricciuto D. M., 2011. Reconstruction of false spring occurrences over the southeastern United States, 1901–2007: an increasing risk of spring freeze damage? *Environ Res. Lett.*, 6, 024015, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/024015>
- Martin M., Gavazov K., Körner C., Hättenschwiler S., Rixen C., 2010. Reduced early growing season freezing resistance in alpine treeline plants under elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 16, 1057-1070.
- Mayr S., Cochard H., Ameglio T., Kikuta S. B., 2007. Embolism formation during freezing in the wood of *Picea abies*. *Plant Physiol.*, 143, 60–67. <https://doi.org/10.1104/pp.106.085704>
- Mcintyre G. N., Lider L. A., Ferrari N. L., 1982. The chronological classification of grapevine phenology. *American Journal of Enology and Viticulture*, 33, 80-85. <https://www.ajevonline.org/content/33/2/80>
- Menzel A., Fabian P., 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, 397, 659, <https://doi.org/10.1038/17709>
- Météo-France, 1986. *Atlas climatique de la France*. Paris, 30 p.
- Mills L. J., Ferguson J. C., Keller M., 2006. Cold-hardiness evaluation of grapevine buds and cane tissues. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57, 2, 194-200. <https://www.ajevonline.org/content/57/2/194>
- Molitor D., Caffarra A., Sinigoj P., Pertot I., Hoffmann L., Junk J., 2014. Late frost damage risk for viticulture under future climate conditions: a case study for the Luxembourgish winegrowing region. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20, 160-168. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12059>
- Molitor D., Junk J., Schultz M., 2019. Massive Spätfrostschäden an der Südlichen Weinmosel. *Die Winzer-Zeitschrift*, Juni 2019, 14-15.
- Morin X., Chuine I., 2014. Will tree species experience increased frost damage due to climate change because of changes in leaf phenology? *Canadian Journal of Forest Research*, 44, 1555-1565. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0282>
- Mosedale J. R., Wilson R. J. & Maclean I. M. D., 2015. Climate Change and Crop Exposure to Adverse Weather : Changes to Frost Risk and Grapevine Flowering Conditions. *PLoS ONE*, 10(10), 16 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141218>
- Neethling E., Petitjean T., Quénel H., Barbeau G., 2017. Assessing local climate vulnerability and winegrowers' adaptive processes in the context of climate change. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, 22(5), 777-803. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9698-0>
- Ningre F., Colin F., 2007. Frost damage on the terminal shoot as a risk factor of fork incidence on common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Ann. For. Sci.*, 64, 79-86. <https://doi.org/10.1051/forest:2006091>, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00884060>
- Oke T. R., 1978. *Boundary Layer Climates*, Methuen, London, 372 p. <https://doi.org/10.1002/qj.49710544628>
- Ollat N., Touzard J. M., Van Leeuwen C., 2016. Climate change impacts and adaptations : New challenges for the wine industry. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 139-149. <https://doi.org/10.1017/jwe.2016.3>
- Pedelaborde P., 1958. *Le climat du Bassin parisien : essai d'une méthode rationnelle de climatologie physique*. Paris, Génin, 539 p.

- Pinty J.-P., Mascart P., Richard E., Rosset R., 1989. An investigation of mesoscale flows induced by vegetation inhomogeneities using an evapotranspiration model calibrated against HAPEX-MOBILHY data. *J. Appl. Meteorol.*, 28, 976-992. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1989\)028<0976:AIOMFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1989)028<0976:AIOMFI>2.0.CO;2)
- Planchon O., 1994. *A propos de la notion de climat maritime*. In: L'air du Temps, Etudes Méditerranéennes, Université de Poitiers, 16, 119-130. <http://geoprodig.cnrs.fr/items/show/84225>
- Planchon O., 1997. *Les climats maritimes dans le Monde*. Thèse de Doctorat, Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, 233 p.
- Planchon O., Endlicher W., 2014. *Dynamique spatio-temporelle du climat de l'Europe centrale : analyse et impacts dans les régions viticoles*. In : Quénol, H. (sous la direction de) *Changement climatique et terroirs viticoles*. Editions Lavoisier Tec&Doc, Chap. 4, 115-146.
- Planchon O., Quénol H., Irimia L.M., Patriche C.V., 2015. European cold wave during February 2012 and impacts in wine growing regions of Moldavia (Romania). *Theoretical and Applied Climatology*, 120 (3), 469-478. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1191-2>
- Planchon O., Quénol H., Wahl L., Cantat O., Bonnefoy C., 2009. Types de circulations atmosphériques et types de temps en situations gélives dans les régions viticoles de la moitié nord de la France. *Geographia Technica*, Numéro Spécial (22^e colloque de l'AIC, Cluj, 1-5 septembre 2009), Cluj University Press, 371-376. http://technicalgeography.org/pdf/sp_i_2009/gt_sp_2009.pdf
- Planchon O., Cantat O., Bois B., 2019. Variabilité climatique printanière et phénologie végétale en Auxois : exemple d'Alise-Sainte-Reine (Côte-d'Or). *Revue Scientifique Bourgogne-Franche-Comté Nature*, 29-2019, 349-364.
- Polgar C. A., Primack R. B., 2011. Leaf-out phenology of temperate woody plants: from trees to ecosystems. *New Phytologist*, 191, 926-941. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03803.x>
- Proust I., Touchais P., 2019. Le gel, comme une vilaine habitude en Loire. <http://www.vitisphere.com/actualite-89345-Le-gel-comme-une-vilaine-habitude-en-Loire.htm>
- Quénol H., 2002. *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral*. Thèse de Doctorat USTL, Édition ANRT, ISBN 2-284-04081-0, 283 p.
- Quénol H., Planchon O., Neethling E., Bonnefoy C., Barbeau G., 2016. *Un exemple d'enjeu du changement climatique après 2050 : le vignoble du Val de Loire*. In Moatar F. et Dupont N. (sous la direction de) : *La Loire fluviale et estuarienne : un milieu en évolution*, Quae Éditions (Collection Synthèses), Chap. 20, 262-265. ISBN : 978-2-7592-2401-2.
- Quénol H., Planchon O., Wahl L., 2008. Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 127-137. <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=1553>
- Quénol H., 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Ed. Lavoisier, coll. Tech. & Doc, 444 p.

- Quénol H., Bonnardot V., 2014. A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the “TERADCLIM” project. *International Journal of Vine and Wine Sciences*, Special Laccave, 23-32.
- Quénol H., Grosset M., Barbeau G., Van Leeuwen K., Hofmann M., Foss C., Irimia L., Rochard J., Boulanger J.-P., Tissot C., Miranda C., 2014. Adaptation of viticulture to climate change: high resolution observations of adaptation scenario for viticulture: the ADVICLIM european project. *Bulletin de l'OIV*, 87, 395-406. <https://prodinra.inra.fr/ft?id={40F7F87E-D2B3-406A-8789-8FCC3A4B6A58}>
- Reid P. C., Hari R. E., Beaugrand G., Livingstone D. M., Marty C., Straile D., Barichivich J., Goberville E., Adrian R., Aono Y., Brown R., Foster J., Groisman P., Hélaouët P., Hsu H., Kirby R. Knight J., Kraberg A., Li J., Lo T.-T., Myneni R. B., North R. P., Pounds J. A., Sparks T., Stübi R., Tian Y., Wiltshire K. H., Xiao D., Zhu Z., 2016. Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology*, 22, 682-703. <https://doi.org/10.1111/gcb.13106>
- Rouvellac E., 2013. *Le terroir, essai d'une réflexion géographique à travers la viticulture*. Dossier d'habilitation à diriger des recherches, volume 2, Université de Limoges, 233 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00933444/>
- Sadras V.O., Reynolds M.P., De La Vega A.J., Petrie P.R., Robinson R., 2009. Phenotypic plasticity of yield and phenology in wheat, sunflower and grapevine. *Field Crops Res.*, 110, 242–250. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.09.004>
- Scheifinger H., Menzel A., Koch E., Peter C., Ahas R., 2002. Atmospheric mechanisms governing the spatial and temporal variability of phenological phases in Central Europe. *International Journal of Climatology*, 22, 1739-1755. <https://doi.org/10.1002/joc.817>
- Schultz H. R., 2000. Climate change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects, *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6, 2-12. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00156.x>
- Sevanto S., Holbrook N. M., Ball M. C., 2012. Freeze/Thaw-induced embolism: probability of critical bubble formation depends on speed of ice formation. *Front. Plant Sci.*, 3, 107. <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00107>
- Sgubin G., Swingedouw D., Dayon G., García de Cortázar-Atauri I., Ollat N., Pagé C., Van Leeuwen C., 2018. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 226-242. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>
- Snyder R. L. et Melo-Abreu J. P. D., 2005. Frost Protection: Fundamentals, Practice and Economics. Volume 1, Rome, Food & Agriculture Org., 223 p. <http://www.fao.org/3/y7223e/y7223e00.htm>
- Sperry J. S., Sullivan J. E. M., 1992. Xylem embolism in response to freezethaw cycles and water stress in ring-porous, diffuse-porous and conifer species. *Plant Physiol.*, 100, 605–613. <https://doi.org/10.1104/pp.100.2.605>
- Tyree M. T., Davis S. D., Cochard H., 1994. Biophysical perspectives of xylem evolution: is there a tradeoff of hydraulic efficiency for vulnerability to dysfunction? *IAWA J.* 15, 335–360. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001369>
- Tyree M. T., Zimmermann M. H., 2002. *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. Berlin: Springer Verlag, 283 p.

Vigneau J.-P., 1997. *Le climat océanisé de la façade atlantique médiane de l'Europe*. In *Le climat, l'Eau et les Hommes*, ouvrage en l'honneur de Jean Mounier, 227-244.

Vigneau J.-P., 2005. *Climatologie*. Armand Colin, coll. Campus, 198 p.

Vitasse Y., Schneider L., Rixen C., Christen D., Rebetez M., 2018. Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005>

Werner P. C., Gerstengarbe F.-W., 2010. *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky*. PIK Report 119, 146 p. <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr119.pdf>

Werner P. C., Gerstengarbe F.-W., 2011. *Spatial-temporal changes of meteorological parameters in selected circulation patterns*. PIK Report 123, 19 p. <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr123.pdf>

Xoplaki E., Trigo R. M., García-Herrera R., Barriopedro D., D'andrea F., Fischer E.M., Gimeno L., Gouveia C., Hernandez E., Kuglitsch F. G., Mariotti A., Nieto R., Pinto J.G., Pozo-Vázquez D., Saaroni H., Toreti A., Trigo I. F., Vicente-Serrano S. M., Yiou P., Ziv B., 2012. Large-Scale atmospheric circulation driving extreme climate events in the Mediterranean and related impacts. In: Lionello P. (ed.), *The Climate of the Mediterranean Region*, Chap. 6, 347-417. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416042-2.00006-9>

Sites internet consultés :

Base de données des Grosswetterlagen (GWL) et Grosswettertypen (GWT) :
<http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr119.pdf>
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/grosswetterlage/grosswetterlage.html>

Bulletin climatique quotidien sur la France (à partir du 1/1/1973) :
https://donneespubliques.meteofrance.fr/donnees_libres/bulletins/BQA/20160427.pdf
(exemple ici pour le 27 avril 2016)

Cave des Vins de Bourgueil :
<http://cavedebourgueil.com/plugins/content/mavikthumbnails/thumbnails/300x225-images-stories-vigne-gele-27-avril-2016.jpg>

Institut Français de la vigne et du vin :
<https://www.vignevin.com/publications/cahiers-itineraires/>

Interloire 2011 :
<https://www.vinsvaldeloire.fr/fr/interloire/>

Journal régional La Nouvelle République :
<https://www.lanouvellerepublique.fr/indre-et-loire/commune/montlouis-sur-loire/week-end-de-portes-ouvertes-et-de-gel>
<https://www.lanouvellerepublique.fr/indre-et-loire/touraine-branle-bas-de-combat-dans-les-vignes-contre-le-gel>

Le Vigneron du Val de Loire :
https://www.vignerondvaldeloire.fr/Gel-les-degats-se-precisent-en-Val-de-Loire_a87.html

Magazine Viti :
<https://www.mon-viti.com/filinfo/viticulture/gel-dans-le-vignoble-du-val-de-loire-une-perte-globale-de-recolte-de-lordre-de>

Magazine Vitisphère :

<https://www.vitisphere.com/actualite-89345-Le-gel-comme-une-vilaine-habitude-en-Loire.htm>

Phénologie et climat de Météo-Suisse :

<https://www.meteosuisse.admin.ch/home/systemes-de-mesure-et-de-prevision/stations-au-sol/reseau-d-observations-phenologiques.html>

Publithèque de Météo-France :

<http://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp?idRubrique=clim>