

Caractérisation et valorisation des terroirs viticoles d'une zone de l'AOP Corse (Linguizzetta – Ghisonaccia)

Application au cépage Vermentinu

Bilan 2018-2023

L'objectif de ce programme est d'améliorer les connaissances relatives aux conditions de développement du Vermentinu dans le cadre du changement climatique :

- en appréhendant le fonctionnement du terroir sur une zone de la côte orientale (influence des températures, du sol ou encore des variables topographiques : distance à la mer, altitude, pente...)
- en étudiant la réponse agronomique de la vigne
- en définissant l'expression des vins de Vermentinu issus de différents contextes agropédoclimatiques.

1. Dispositif expérimental

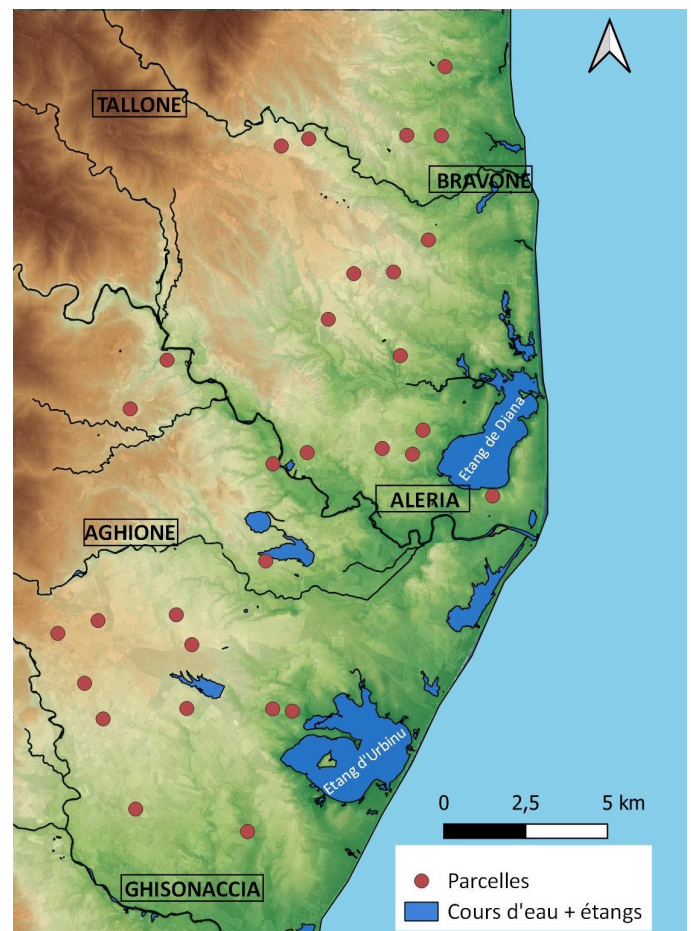
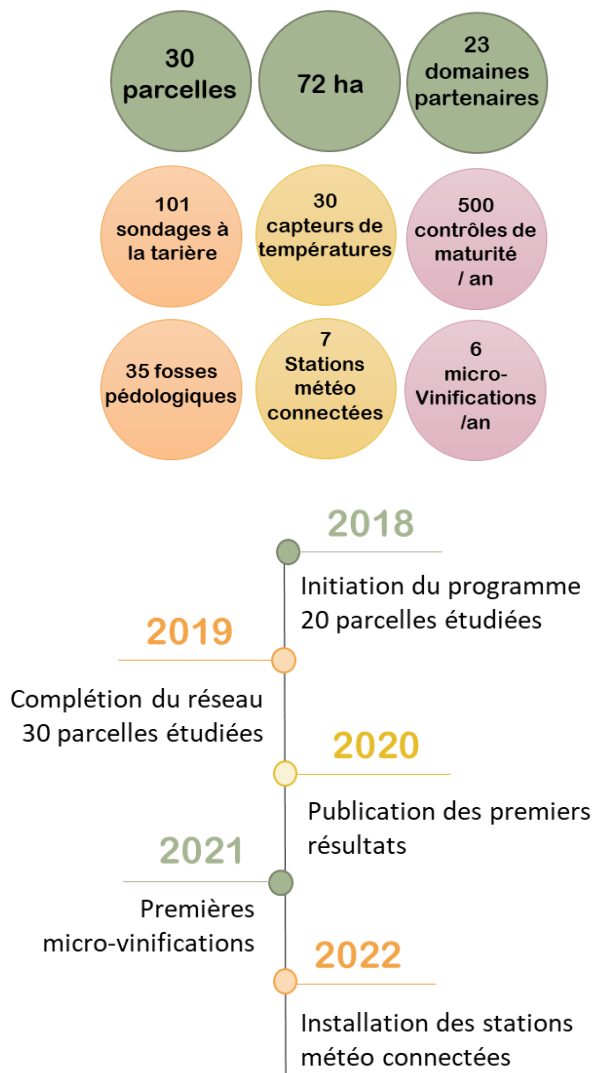
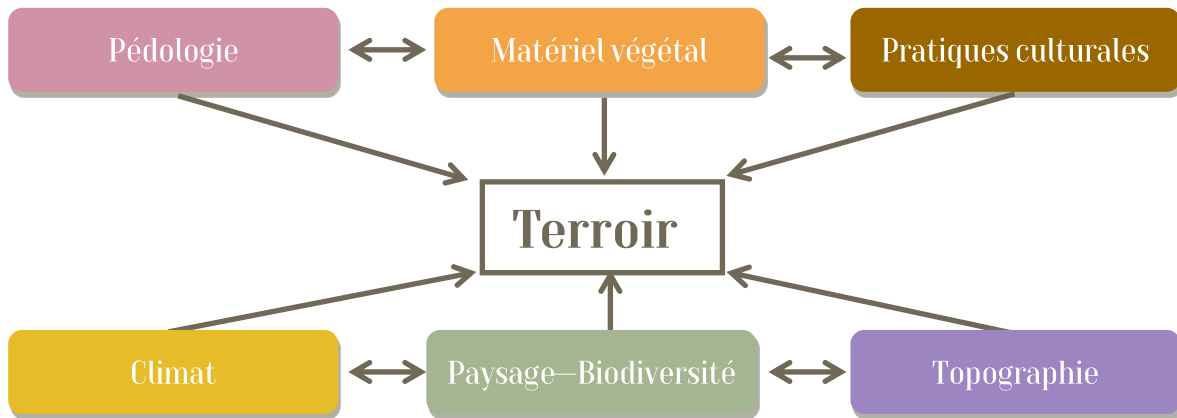


Fig 1. Localisation des parcelles sur la zone d'étude

Le terroir vitivinicole est un concept défini par l'organisation internationale de la vigne et du vin (OIV) en 2010 et qui se réfère à un espace sur lequel se développe diverses **interactions** :



2. Etude pédologique



Fig 2. Sondage à la tarière

La pédologie est la science qui étudie la formation et l'évolution des sols. Ces évolutions sont liées à **l'altération de la roche mère**, **l'incorporation de matériel organique** (végétation, faune du sol...) mais également au **transfert de matière** (érosion, lessivage, engorgement...). C'est pourquoi, il est commun d'observer **différents types de sol** suivant les parcelles.

Toutefois, la nature des sols est un facteur **stable à l'échelle humaine**.

Des **sondages à la tarière** (fig. 2), des **fosses pédologiques** (fig. 3) et des **analyses de sol** ont permis de caractériser la pédologie des parcelles étudiées.



Fig 3. Fosse pédologique

Diverses classes texturales ont été référencées lors de l'étude des sols. **Le sable est la texture dominante** (fig. 4).

En condition de culture, les sols sableux sont des sols **bien aérés propices au développement racinaire et favorables au travail du sol**. Toutefois, ils ont une **faible capacité de rétention de l'eau et des éléments minéraux**. Les sols sableux sont également **plus sensibles aux phénomènes d'érosion** et présentent une température de l'horizon de surface plus élevée durant la journée. Les sols sableux **réfléchissent beaucoup plus le rayonnement solaire** que les sols argileux, engendrant un micro-climat de la vigne, et surtout des grappes, plus chaud.

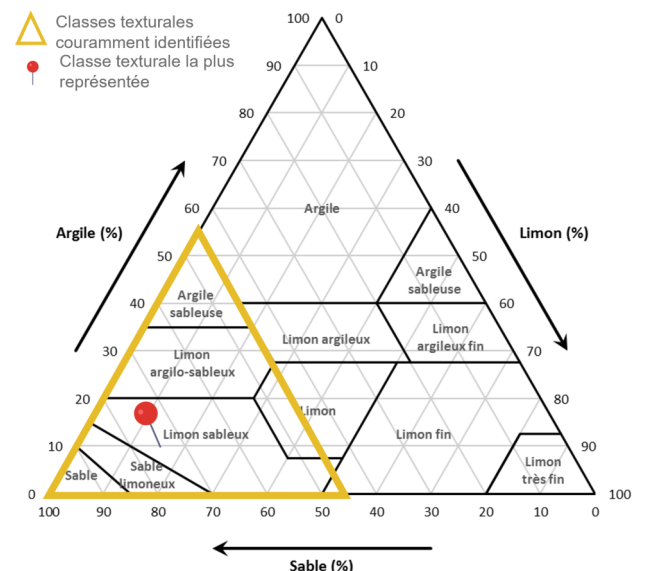


Fig 4. Triangle des textures

Il existe une **variabilité pédologique** entre les parcelles étudiées. En plaine orientale, ces différences sont généralement en lien avec **l'âge des alluvions** (dépôts sédimentaires transportés par d'anciens cours d'eau).

Ainsi, **8 grands type de sol** ont été identifiés sur le réseau (fig. 5) (d'après le Référentiel Pédologique Français - Baize et Girard, 2008).

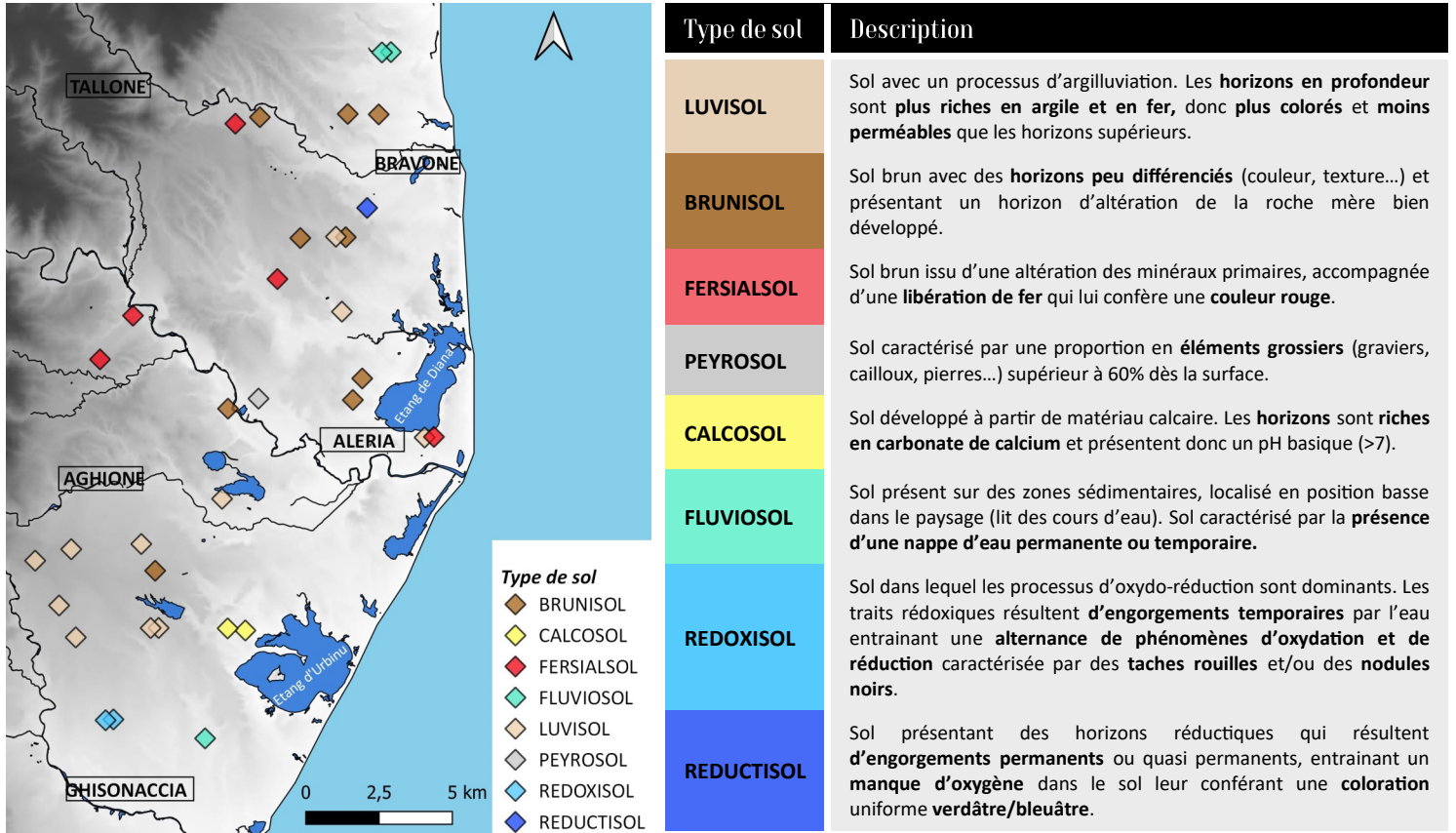


Fig 5. Carte des différents type de sols des parcelles étudiées et tableau explicatif des caractéristiques générales associées à ces types de sol

De manière générale, les sols étudiés présentent les caractéristiques physico-chimiques suivantes :

MO < 2%

La teneur en matière organique d'un sol à destination de la culture de la vigne doit avoisiner 2% afin de fournir la vigne en éléments nutritifs et apporter l'énergie nécessaire aux micro-organismes du sol. Un amendement organique doit être réalisé si le taux est en deçà de cette valeur.

Bonne activité biologique

Le rapport de la teneur en carbone total sur la teneur en azote total du sol (C/N) traduit sa capacité à décomposer la matière organique. Une valeur comprise entre 10 et 12 est recherchée pour une activité biologique ni trop lente ni trop rapide.

pH neutre

Un pH équilibré (≈ 7) est favorable à la croissance racinaire et à la vie microbienne du sol et donc à la décomposition de la matière organique.

CEC < 10 (meq/100g)

Les sols sableux ont des faibles Capacité d'Echange Cationique (CEC) par nature. La quantité de cation (éléments chargés positivement) que le sol peut fixer est donc limitée. Les apports de fertilisation doivent être fractionnés pour garantir une bonne rétention de l'amendement.

Mg > K

Les sols sont plus riches en magnésium qu'en potassium. Ces deux macro-éléments, indispensables au développement de la vigne, sont antagonistes. Lorsque l'un est en excès, l'absorption de l'autre se retrouve freinée. Le ratio doit donc être corrigé.

CE QU'IL FAUT RETENIR - Pédologie

- Les sols de la zone d'étude sont **majoritairement sableux**.
- On distingue **8 grands types de sol**. De manière générale leurs **caractéristiques sont favorables à la culture de la vigne**, même si pour certaines parcelles des apports d'éléments minéraux pourraient être réalisés afin d'améliorer leur potentialité agronomique. Par ailleurs, certains sols présentent des **spécificités** qui peuvent être un frein au développement racinaire, comme :
 - la présence d'un **important taux d'éléments grossiers** (cailloux, pierres, blocs) pour les PEYROSOLS
 - la présence d'**hydromorphie** retrouvée dans les REDOXISOL et REDUCTISOL
- L'adéquation sol/porte-greffe ainsi que les relations entre le sol et la physiologie de la vigne sont en cours d'étude.

3. Etude climatique



Il est entendu que la Corse évolue dans son ensemble dans un **climat méditerranéen**, toutefois, à une échelle plus restreinte, celle de la microrégion, le mésoclimat présente des spécificités annuelles et spatiales.

La caractérisation climatique s'appuie sur les données issues des **capteurs de températures** et des **stations météorologiques connectées** installés sur les parcelles du réseau. Certaines données ont été extraites des stations MétéoFrance.

Un petit rappel...

Bien que la vigne soit considérée comme une **plante résistante à la sécheresse** en raison de ses besoins modestes en eau, en conditions extrêmes, certains **facteurs abiotiques** tels que le rayonnement lumineux, la chaleur et le manque d'eau sont **préjudiciables** à son développement. Selon la durée et l'intensité de ces stress, les **dommages** engendrés peuvent se présenter sous diverses formes. Il a été observé une **avancée des stades phénologiques**, de **l'échaudage** sur les baies, des **difficultés de maturation**, une **augmentation des teneurs en sucre** et une **dégradation des acides des baies**, mais également une **diminution des rendements**...



3.1. La pluviométrie

À l'échelle régionale

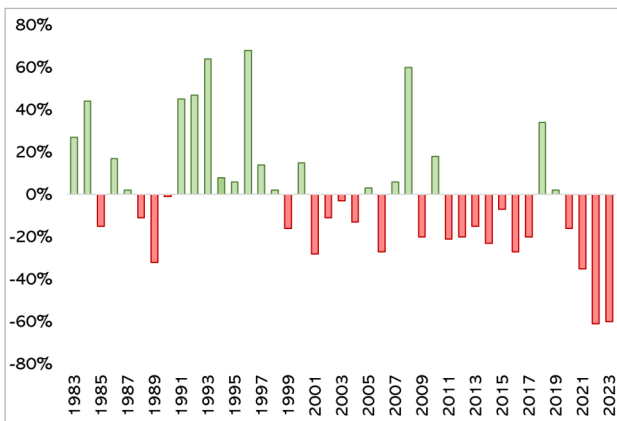


Fig 6. Ecart au cumul moyen depuis 40 ans de la pluviométrie annuelle. Source : MétéoFrance—Station Bastia Poretta

Au niveau de la zone d'étude, c'est-à-dire la côte orientale (attention toutefois, les données n'étaient disponibles que pour la station MétéoFrance - Bastia Poretta), la **moyenne annuelle du cumul de précipitations depuis 40 ans est d'environ 815 mm** (fig. 6)

Ces précipitations sont caractérisées par une importante variabilité d'une année à l'autre puisqu'en 1996 ce cumul a atteint 1370 mm tandis qu'en 2022 il était seulement de 320 mm.

Ces 10 dernières années sont marquées par un cumul annuel bien en deçà de la moyenne.

À l'échelle locale

En ce qui concerne la période d'étude, de 2018 à 2023, et à une échelle plus locale (données issues de la station MétéoFrance d'Alistru), le cumul annuel varie également (fig. 7). La **répartition mensuelle** des pluies est, elle aussi, **irrégulière** et variable suivant les millésimes.

Le **millésime 2022 est l'année la plus aride jamais enregistrée depuis ces quinze dernières années**. La période sèche a duré 3 mois (de mi-mai à mi-août).

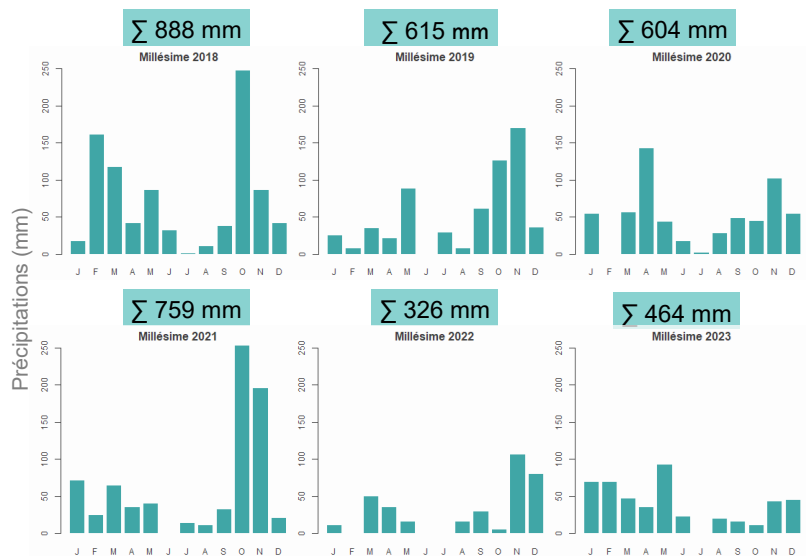


Fig 7. Cumul de pluviométrie annuel et mensuel de 2018 à 2023. Données : Station MétéoFrance d'Alistru

♦ À l'échelle de la parcelle

Jusqu'à 80 mm de différence. C'est l'écart maximal de la somme de pluie reçue entre la parcelle la plus alimentée en eau et celle la moins alimentée, sur la saison de végétation - du 1^{er} avril au 30 septembre (données issues des stations météorologiques connectées installées depuis 2022 sur 7 des parcelles). En condition sèche comme en 2022, ce delta de 80 mm peut impacter fortement le fonctionnement de la vigne.

Effet positif théorique de la pluie (+)	Effet négatif théorique de la pluie (-)
<p>Certaines périodes pluvieuses vont être favorables à la recharge des sols en eau tandis que d'autres vont être bénéfiques au rendement (Bonada et al, 2020). Par ailleurs, on considère qu'une quantité de pluie inférieure à 10 mm sur une période de 2 jours consécutifs n'a pas d'impact sur les réserves en eau du sol. A l'inverse, au-delà de 50 mm en 24 heures, les quantités excédentaires de pluies ruissellent et ne pénètrent pas dans le sol.</p>	<p>Associée à des températures froides et à un temps couvert, la pluie durant la période de floraison de la vigne peut entraîner de la coulure. La pluie joue également un rôle prépondérant dans le développement des maladies fongiques. Une forte pluviométrie après la véraison des baies peut entraîner une maturation compliquée.</p>

Les besoins en eau de la vigne sont variables suivant les saisons et les périodes pluvieuses n'auront pas le même impact sur le végétal. Dans les conditions de cette étude menée sur le Vermentinu en côte orientale, il existe une **forte corrélation entre la quantité de pluie tombée durant les mois de mars à juin et la quantité d'azote assimilable (et d'azote ammoniacal) dans les baies à maturité**. Cette relation a déjà été démontrée dans d'autres études (fig. 8).

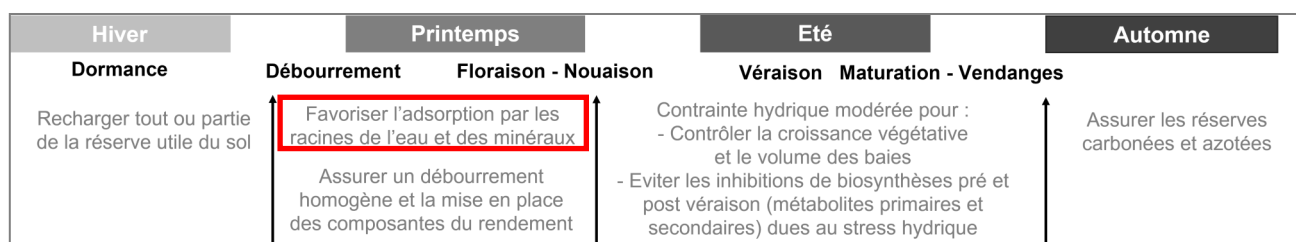


Fig 8. Les besoins de la vigne en eau. Source : Deloire A. et Pellegrino A. 2021

Bien qu'intuitive, la relation entre la pluviométrie et la contrainte hydrique ressentie durant la maturation par la vigne n'est pas aussi simple à établir. La suite de ce document permettra d'identifier d'autres causes de stress hydrique.

Le lien entre les profils aromatiques des vins blancs et le statut hydrique de la vigne demande à être encore approfondi (les études étant plus fouillées et plus nombreuses sur les cépages noirs).

La synthèse du sixième rapport d'évaluation du **Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC)** a été publiée en mars 2023. Ce dernier **atteste d'une augmentation des risques de précipitations extrêmes** en plus d'une fréquence plus élevée des vagues de chaleur.

La Corse, et notamment la côte orientale, a déjà été touchée par des épisodes de type Cévenol, comme le 4 octobre 2021 où sont tombés 174 mm de pluie en moins de 24h (données station MétéoFrance Alistru). Au-delà des risques importants de crues, ces **pluies diluviennes entraînent une considérable érosion des sols** (décapage de la couche supérieure des sols). Une **couverture végétale** des sols viticoles (enherbement spontané ou couverts végétaux semés) **est encouragée** car elle améliore la structure des sols et minimise le risque d'érosion.

CE QU'IL FAUT RETENIR - Pluviométrie

- Les précipitations varient d'une année à l'autre, mais on constate que les **quantités de pluie diminuent** sur la façade Est de la Corse depuis plusieurs années.
- Les quantités de pluie reçues par parcelle varient selon sa localisation et selon la période de l'année.
- Les données de cette étude mettent en évidence qu'une **faible pluviométrie entre mars et juin** impacte négativement les **teneurs en azote assimilable** des moûts, une **complémentation** devient alors indispensable pour éviter les **problèmes de fermentescibilité** des moûts.
- Les différents **scénarios de l'évolution du climat prévoient une augmentation d'événements pluvieux extrêmes**, les pratiques d'entretien des sols doivent donc être adaptées (couverture végétale).

3.2. Les températures

◆ À l'échelle de la côte orientale

L'augmentation de la température à la surface du globe a connu un rythme variable mais elle est particulièrement marquée depuis les années 1980. A l'échelle de la France continentale, la tendance observée est de +0.3 °C par décennie. L'année 2022 est l'année la plus chaude jamais enregistrée sur la période 1900 - 2022.

Ce constat se vérifie sur l'île avec une élévation des températures moyennes annuelles. Sur la période 2002-2023, l'augmentation de la température moyenne est de +0.9°C par décennie (fig. 9). Depuis 2014, la température moyenne annuelle enregistrée par la station MétéoFrance d'Alistru est supérieure à 17.5°C.

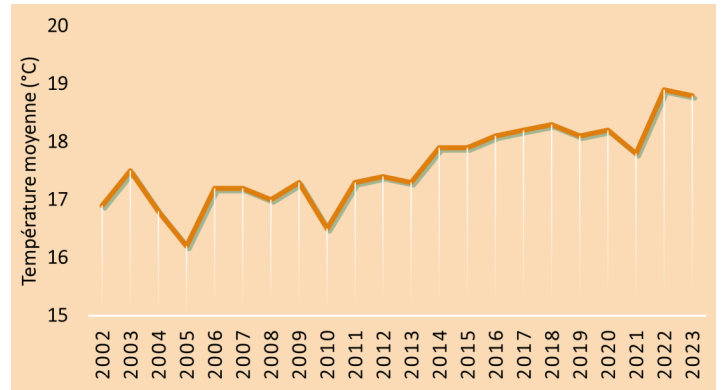


Fig 9. Températures moyennes annuelles de 2002 à 2023
Source : Station MétéoFrance Alistru

Le millésime 2023 est également une année chaude puisqu'il enregistre des records de températures maximales (Tmax) pour les mois de juillet, août, octobre et novembre.



Record (depuis 2000)

Données MétéoFrance,
Station Alistru

Tmax 2023 **J**uillet

37.3 °C

Août

37.4 °C

Octobre

31.3 °C

Novembre

27.5 °C

◆ À l'échelle de la zone étudiée

A l'échelle parcellaire, au-delà de la température moyenne, 2 autres catégories de températures sont distinguées, la température minimale (nocturne) et la température maximale (diurne) car elles ne suivent pas la même cinétique inter et intra annuelle.



Tmin

Température la plus basse enregistrée la nuit (souvent juste avant la levée du jour)



Tmax

Température la plus haute enregistrée la journée (environ 1h après le midi solaire)

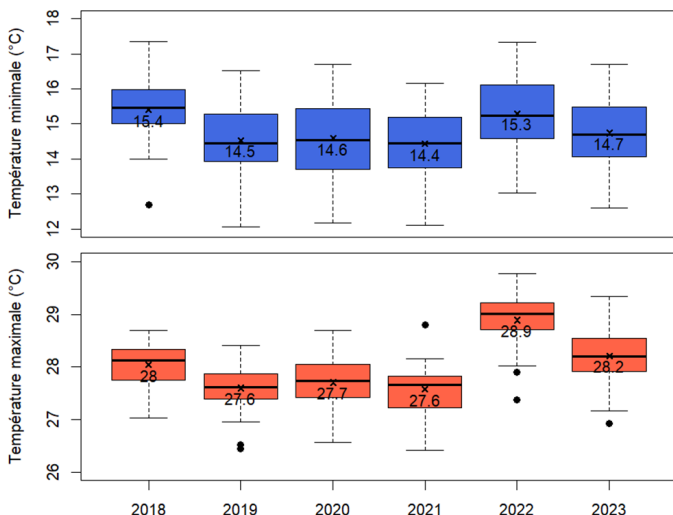


Fig 10. Valeurs minimales, maximales, médiane et quartiles (boxplot) des températures minimales et maximales moyennées du 01/04 au 30/09 sur le réseau de 30 capteurs

Ces températures ont été moyennées sur l'ensemble des 30 capteurs (parcelles) et sur la saison de végétation, qui s'étend du 1er avril au 30 septembre.

Les Tmin oscillent autour de 15°C tandis que les Tmax moyennes sont proches de 28°C. Certaines parcelles présentent des températures plus fraîches que ces moyennes et d'autres beaucoup plus élevées (fig. 10).

Chaque millésime présente des variations de ces tendances. Les Tmin ont été particulièrement élevées en 2018 et encore plus en 2022. Les Tmax ont, quant à elles, été supérieures en 2022 et 2023.

◆ À l'échelle de la parcelle

Il existe des **variations importantes** entre les parcelles (fig. 11). Elles peuvent varier d'une année à l'autre, mais des tendances sont observées.

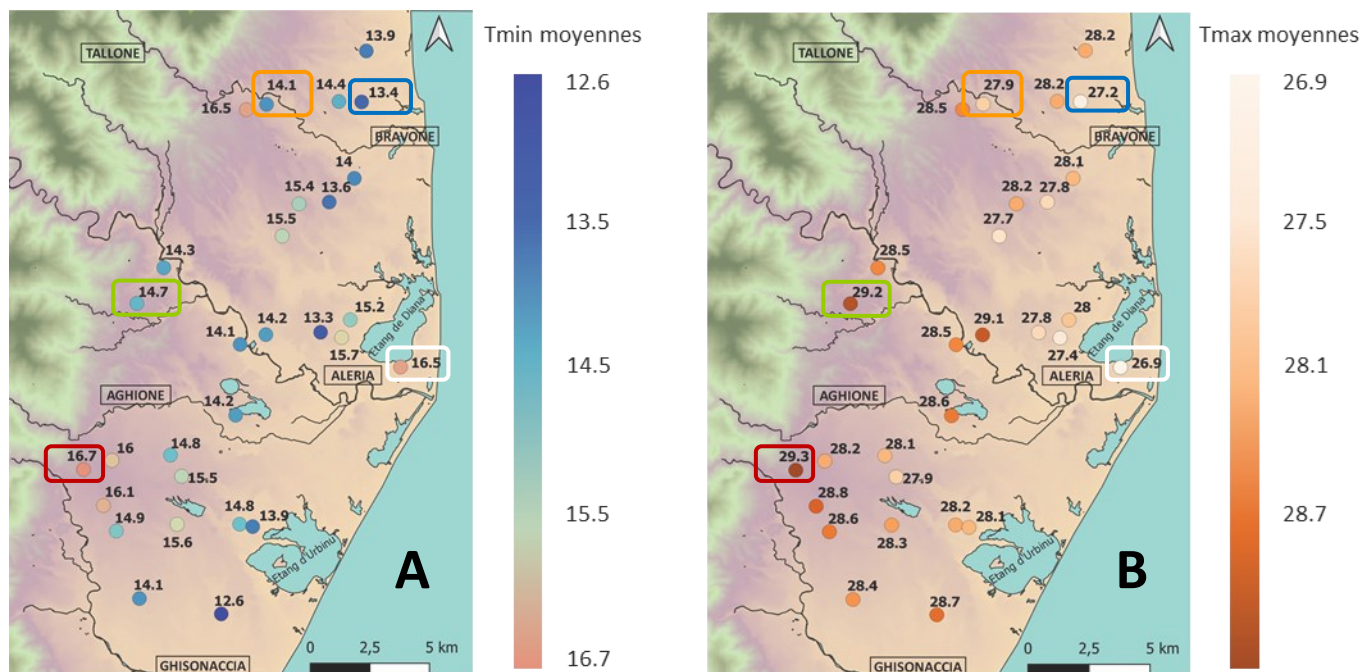


Fig 11. Températures minimales (A) et maximales (B) moyennes sur la saison de végétation du millésime 2023 (1er avril au 30 septembre) pour chaque parcelle du réseau

5 classes climatiques* ont été définies par le CRVI (fig. 12). Un exemple de parcelle de chaque classe est encadré ci-dessus.

Légende	Nombre de parcelles		
	2021	2022	2023
Parcelles avec un climat « chaud » en globalité : températures élevées de jour comme de nuit.	11	12	8
Parcelles avec un climat « tempéré » : températures moyennes.	9	6	9
Parcelles présentant d'importantes amplitudes thermiques : températures fraîches durant la nuit mais élevées en journée.	1	5	2
Parcelles présentant d'importantes amplitudes thermiques inverses à la catégorie précédente : températures fraîches en journée mais élevées la nuit.	3	1	1
Parcelles avec un climat « frais » à « très frais » : températures basses de jour comme de nuit.	4	5	8

* ces classes climatiques ne sont vraies qu'à l'échelle du réseau de parcelles

Fig 12. Classes climatiques des parcelles étudiées

Les vignobles et le potentiel viticole des régions à l'échelle mondiale peuvent être catégorisés d'après la classification de Huglin établie en 1978. Cet indice bioclimatique est basé sur la demi-somme des températures maximales et moyennes (> à 10°C - valeur définie comme le 0 végétatif de la vigne) du 1er avril au 30 septembre. Depuis 2022, certaines parcelles du réseau d'étude, initialement classées en climat « chaud » évoluent désormais dans un climat viticole « très chaud » soit la 6^{ème} et dernière catégorie de la classification. Il y a tout juste 20 ans, en 2004, ce climat viticole n'était identifié que pour peu de pays du monde, dont la Tunisie, le Brésil, la Californie et l'Inde.

CE QU'IL FAUT RETENIR - Températures

- L'augmentation des températures est incontestable à l'échelle mondiale et ce constat se vérifie en Corse.
- Les années 2022 et 2023 sont les plus chaudes jamais enregistrées sur l'île. Le climat viticole (défini par la classification de Huglin) est passé pour certaines parcelles de « chaud » à « très chaud » en 6 ans d'étude.
- Les 30 capteurs de température montrent qu'il existe d'importantes variations de températures d'une parcelle à l'autre, d'autant plus que les températures nocturnes et diurnes ne suivent pas la même dynamique selon la zone. Cette étude a permis au CRVI de hiérarchiser les parcelles selon cinq classes climatiques.

3.3. Modélisation des températures

Grâce aux données ponctuelles (valeur pour chaque parcelle étudiée), les **températures peuvent être modélisées en tout point de l'espace par une interpolation** (fig. 13).

Les différences sont plus marquées suivant les zones (vallons, vallées...) pour les **Tmin** que pour les **Tmax**.

Chaque année, les **Tmin** les plus élevées sont recensées autour des communes d'Aghione et de Maison Pieraggi.

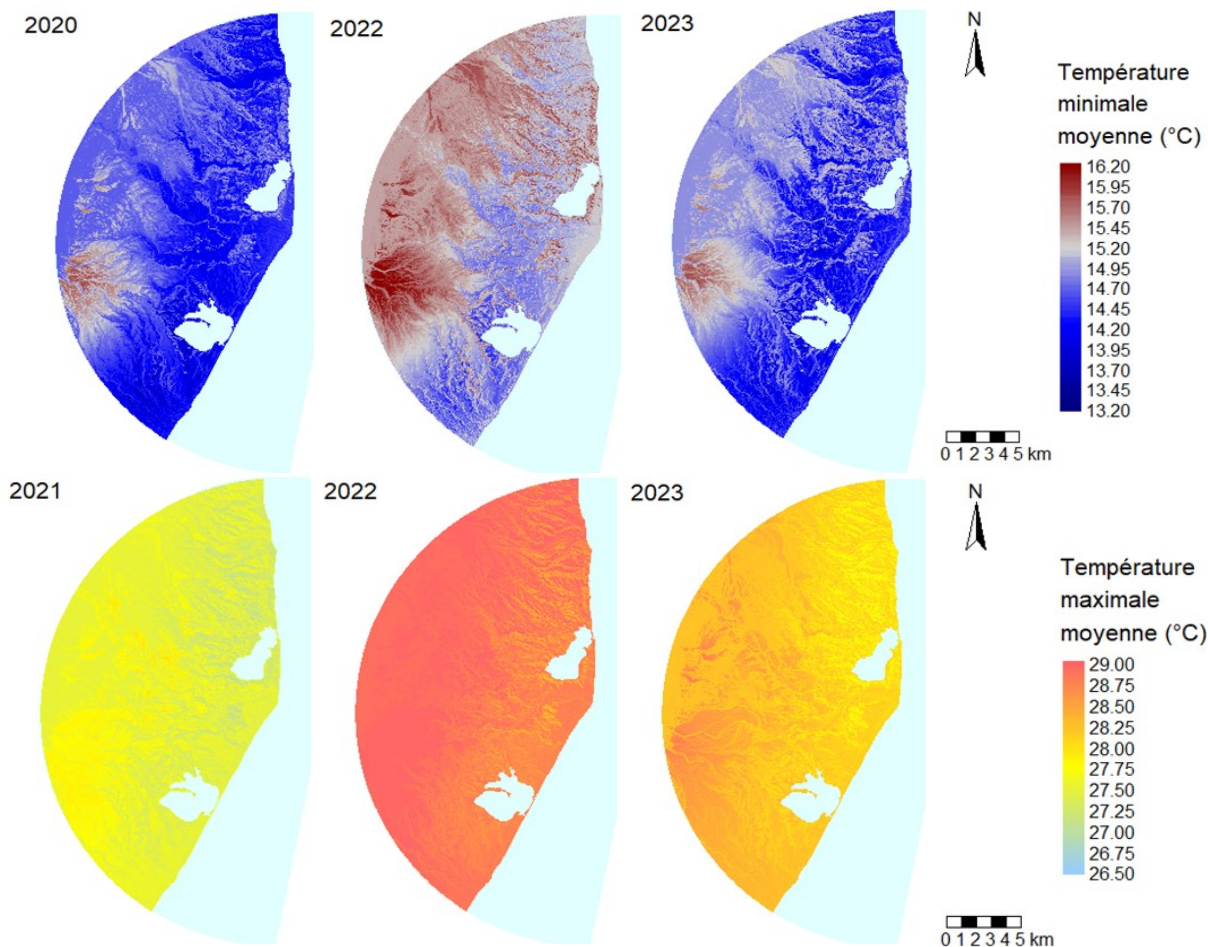
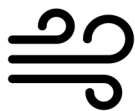


Fig 13. Modélisation des températures minimales et maximales en tout point de la zone d'étude sur la période de végétation (1er avril—30 septembre)

Cette **répartition spatiale des températures n'est pas figée dans le temps** sur l'ensemble de la saison de végétation. Par exemple, les **différences thermiques entre les parcelles** (amplitudes) sont **fortement marquées lors des nuits avec un ciel dégagé** tandis que l'amplitude est moindre lorsqu'une couverture nuageuse est présente. La présence de **vent joue également un rôle**. En effet, suivant la force et l'orientation du vent, les masses d'air vont être mélangées et les températures redistribuées. Les parcelles venteuses présentent donc de faibles amplitudes journalières.



En sols sableux, le **vent favorise l'érosion éolienne**, mais il est surtout préjudiciable car il **favorise l'évaporation de l'eau contenue dans les sols et dans les plantes**. Le vent peut donc entraîner un assèchement du feuillage et, dans les cas les plus extrêmes, un stress hydrique.

Même si le millésime 2023 présente des températures moyennes inférieures à celles du millésime 2022 l'augmentation des **Tmax** est incontestable puisque, contrairement aux années antérieures à 2022, les **Tmax** en 2023 sont supérieures à 27.7 degrés en tout point de la zone.

Ces **fortes températures aggravent la sécheresse** en augmentant l'évaporation de l'eau contenue dans les plantes et dans le sol et **peuvent également être dommageables à l'activité photosynthétique de la vigne**.



Nombre de jours > 35 °C sous abri solaire* :

- 2018 à 2021 : max 11 jours
- 2022 et 2023 : max 23 jours

Température optimale de la photosynthèse : 25 - 30 °C
(variable suivant les cépages)
T > 40 °C : fermeture des stomates, absence de photosynthèse

* à noter que la température de l'air n'est pas celle du feuillage ni celle du raisin

3.4. Relations températures – topographie

Chaque parcelle présente ses propres **caractéristiques topographiques** (pente, distance à la mer, exposition, orientation des rangs...). Ces variations topographiques expliquent assez bien la répartition des températures sur la zone étudiée (environ 30%).

Attention : la variable « altitude » est à relativiser puisque sur le réseau, la parcelle la plus haute est située à 120 mètres au-dessus du niveau de la mer. Il n'est pas question de « terroir d'altitude » dans cette étude.

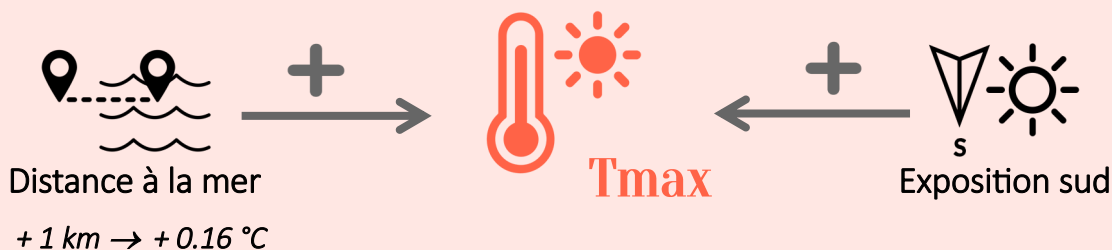
Tout au long de la saison de végétation (01/04 au 30/09), les **Tmin** sont principalement impactées par 2 facteurs :



Le gain d'altitude entraînant une augmentation des Tmin est contradictoire avec d'autres études. Le caractère insulaire de la zone étudiée est certainement la raison de ces résultats.

Les parcelles pentues présentent des Tmin plus élevées. Plusieurs études ont démontré que l'air froid s'écoule le long des pentes, limitant le refroidissement nocturne pour les parcelles pentues.

En ce qui concerne les **Tmax**, les relations décrites ci-dessous sont vraies pour la période post-véraison (15/07 au 30/09) :



La mer semble jouer un rôle de régulateur thermique durant la période estivale, limitant les températures élevées en journée.

Une exposition sud de la parcelle augmente les Tmax. En effet, le bilan radiatif est plus important pour les parcelles exposées au sud.

Il reste une **part importante de variabilité des températures non expliquée à ce jour**, environ 50% des conditions thermiques sont liées à d'autres caractéristiques de la parcelle. Ce sont des facteurs qui ne sont, pour l'heure, pas quantifiés mais qui joueraient à l'échelle locale sur les températures (effet du paysage : haies, cours d'eau...)

Ces premières conclusions sont un début de piste de réflexion quant aux choix des lieux de plantation en situation de dérèglement climatique, et donc dans le cas de la recherche de parcelles « fraîches » dont les températures basses retardent la maturité et favorisent la synthèse des précurseurs aromatiques et des polyphénols (Peyrot des Gachons et al., 2005).

CE QU'IL FAUT RETENIR - Modélisation et influence des températures

- Les températures (diurnes et nocturnes) présentent des variations annuelles et spatiales. Elles varient suivant le millésime, les conditions climatiques (couverture nuageuse, vent...) mais également suivant les caractéristiques topographiques de chaque parcelle :
 - Les parcelles les plus en altitude (jusqu'à 120 m) et les plus pentues sont les plus chaudes la nuit.
 - Les parcelles les plus éloignées de la mer et orientées Sud sont les plus chaudes la journée.
- Les modélisations permettent d'identifier la distribution des zones froides et des zones chaudes.
- Les fortes températures enregistrées depuis 2022 peuvent être un frein à l'activité photosynthétique de la vigne, et donc impacter négativement l'avancée de la maturité et le rendement.
- Les données collectées pourront à terme permettre d'établir différents modèles de prévision des conditions climatiques des années à venir.

4. Etude phénologique



Des relevés hebdomadaires sur chacune des parcelles permettent de caractériser les **3 principaux stades phénologiques** (débourrement, floraison, véraison).

Les ceps étudiés sont taillés par l'équipe de CRVI depuis 2021 durant le mois de janvier.

♦ À l'échelle globale du réseau

	2018*	2019	2020	2021	2022	2023
Débourrement	-	-	-	8 avril	17 avril	7 avril
Floraison	27 mai	10 juin	28 mai	2 juin	29 mai	29 mai
Véraison	23 juillet	2 août	31 juillet	30 juillet	24 juillet	1 août

* réseau de parcelles incomplet

Fig 14. Date moyenne d'atteinte des stades phénologiques : débourrement, floraison et véraison pour les 6 millésimes d'étude

Bien que chaque stade phénologique ait lieu à une période similaire chaque année, c'est-à-dire entre fin mars et mi-avril pour le débourrement, fin mai pour la floraison et entre fin juillet et début août pour la véraison, des **écarts de précocité d'une quinzaine de jours sont observables entre les millésimes** (fig. 14).

Ces variations de phénologie inter-millésimes peuvent être directement **mises en relation avec les températures**. On observe que le printemps plus chaud (que la moyenne) du millésime 2018 a induit une floraison précoce et, à l'inverse, les basses températures enregistrées durant les mois d'avril et de mai 2019 ont entraîné une floraison tardive (fig. 15).

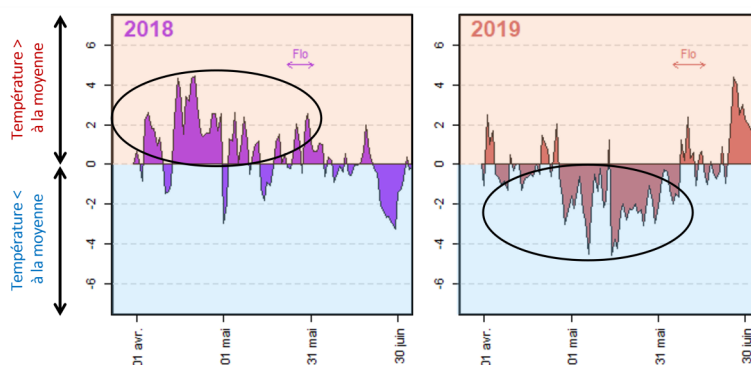


Fig 15. Ecart à la température moyenne de la période 2018-2023 pour les millésimes 2018 et 2019

Au cours d'un même millésime, aucune corrélation n'est établie entre les différents stades phénologiques. En effet, dans les conditions de cette étude, il n'existe pas de lien entre un débourrement précoce et une maturité précoce. Le millésime 2022 en est un bon exemple puisque le débourrement a été tardif tandis que la véraison est intervenue très tôt, entraînant une maturation précoce.

♦ Différences intra-parcellaires

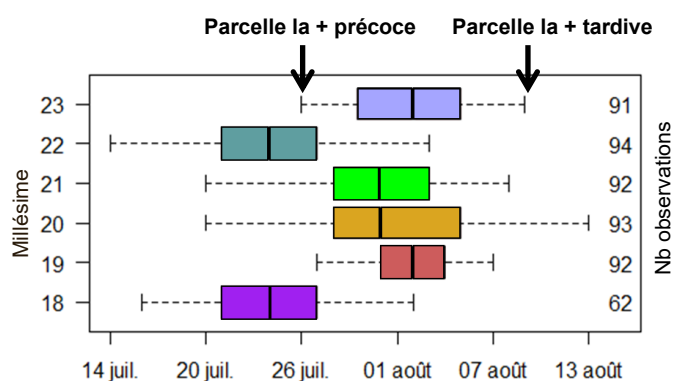


Fig 16. Périodes de véraison des 5 années d'étude (Boxplot)

Les **écarts de précocité** ne sont pas seulement observables à l'échelle annuelle mais également à l'échelle du réseau de parcelles (fig. 16).

Certaines années, la véraison (tout comme d'autres stades) se déroule sur un laps de temps plus restreint comme en 2019. Le millésime 2020 se démarque, lui, par l'étalement de la véraison, qui a commencé le 19 juillet pour la parcelle la plus précoce et s'est poursuivie jusqu'au 12 août pour la parcelle la plus tardive. Cette dynamique de véraison a été à l'image de la cinétique de maturation des baies (cf. Partie 5).

Pour la véraison, la zone la plus précoce semble être localisée entre Ghisonaccia et Aghione tandis que la zone la plus tardive semble se trouver autour de l'étang d'Urbino. Cette répartition sera expliquée dans la partie suivante.

Il existe également des **différences de phénologie au sein même des parcelles**. Ces différences sont variables **suivant la superficie et les caractéristiques topographiques** des parcelles (pente, butte...).

Les **disparités observées au cours de la véraison sont également visibles durant la maturation**, c'est pourquoi il est recommandé de prélever des raisins à divers endroits de la parcelle lors des contrôles de maturité. Ainsi, les résultats des prélèvements seront plus en accord avec la récolte.

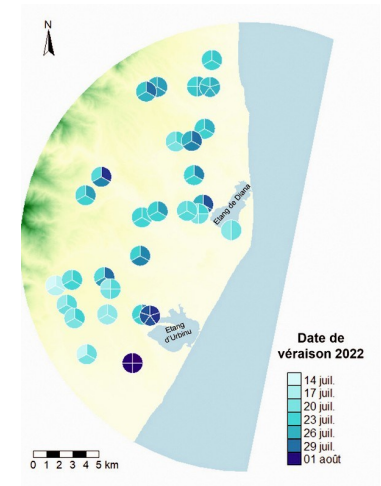


Fig 17. Date de véraison pour chacune des parcelles

◆ Variables explicatives de la phénologie

L'étude terroir a mis en évidence que la **date de débourrement est fortement dépendante de la température de l'air et notamment de la température minimale durant la période hivernale** du 1^{er} janvier au 31 mars (cette relation a été démontrée pour les données du millésime 2022). D'autres études mettent également en avant l'impact de la température et l'humidité du sol sur la date de débourrement (Van Leeuwen et al., 2009).

Pour ce qu'il en est des stades floraison et véraison, il a été montré que même si **d'autres paramètres pouvaient ponctuellement influencer la phénologie** (rapport publié en 2020), tous les travaux de recherche sont unanimes et seules les températures sont les paramètres prépondérants impactant significativement ces stades phénologiques.

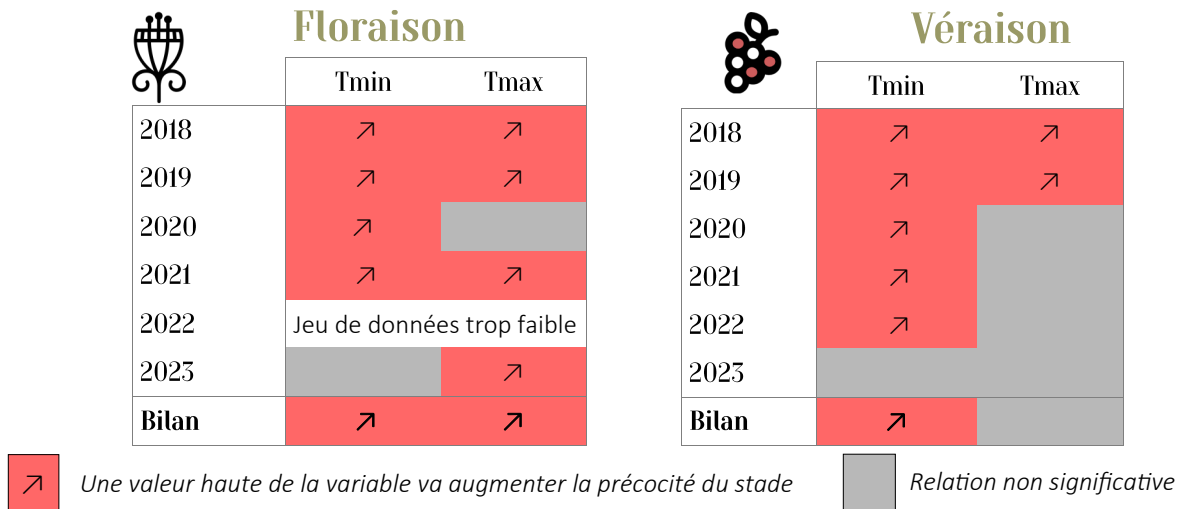


Fig 18. Relations entre les facteurs environnements et agronomiques et les stades floraison et véraison

Dans les conditions expérimentales de l'étude, la **date de floraison est impactée par les températures minimales et maximales** eu égard au millésime (fig. 18). En ce qui concerne la **date de véraison, ce sont les températures nocturnes qui ont un effet supérieur** : plus les températures sont élevées durant la nuit, plus la véraison sera précoce.

CE QU'IL FAUT RETENIR - Phénologie

- La **phénologie** de la vigne (débourrement, floraison et véraison) varie **selon** :
 - Le **millésime**, jusqu'à 15 jours suivant les températures annuelles
 - La **zone de la plaine**, jusqu'à 20 jours suivant la classe climatique des parcelles
- Ces variations entraînent des **écarts de date de maturité**.
- On constate que la précocité d'un stade n'entraîne pas forcément la précocité du stade suivant (comme en 2022).
- Les **températures élevées** sont responsables d'une **apparition précoce de l'ensemble des stades végétatifs**.
- Dans le cadre du dérèglement climatique où la maturité est atteinte de plus en plus tôt en saison, le choix d'une **parcelle avec des températures nocturnes basses** permettra de **retarder le début du cycle de maturation** (véraison).

5. Etude de la maturité



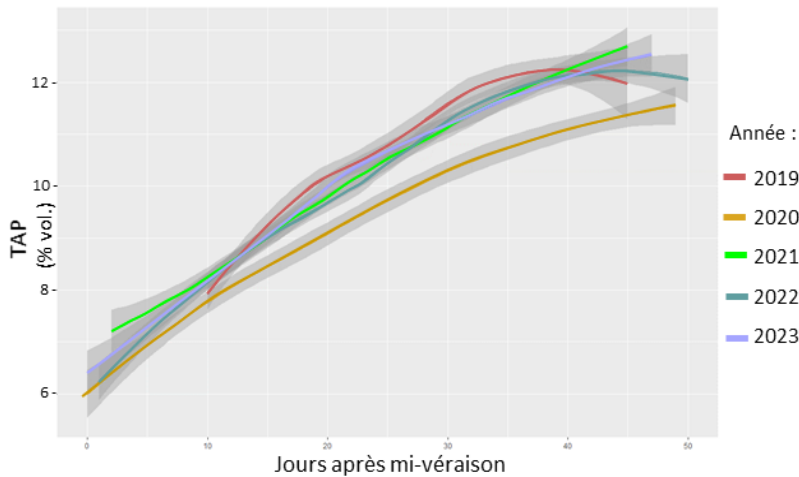
La dynamique de maturation est décrite grâce à la réalisation de **plusieurs contrôles de maturité** sur chacune des parcelles, et ce, **toutes les semaines** du stade véraison jusqu'à la récolte.

Données d'acidité plus basses pour ce millésime plus chaud

À l'échelle du réseau en globalité

	2019	2020	2021	2022	2023
Date du contrôle	26-27 août	31 août - 1 ^{er} sept	30-31 août	22-23 août	28-29 août
TAP	10.8	10.2	11.2	11.2	10.7
Acidité Totale	4.52	4.16	4.15	3.69	4.08
pH	3.34	3.34	3.36	3.54	3.48
Poids des baies	2.62	3.09	2.93	2.99	3.06
Azote assimilable	150	182	160	160	173

Fig 19. Données moyennes de l'ensemble des contrôles de maturité lors du dernier prélèvement commun à toutes les parcelles



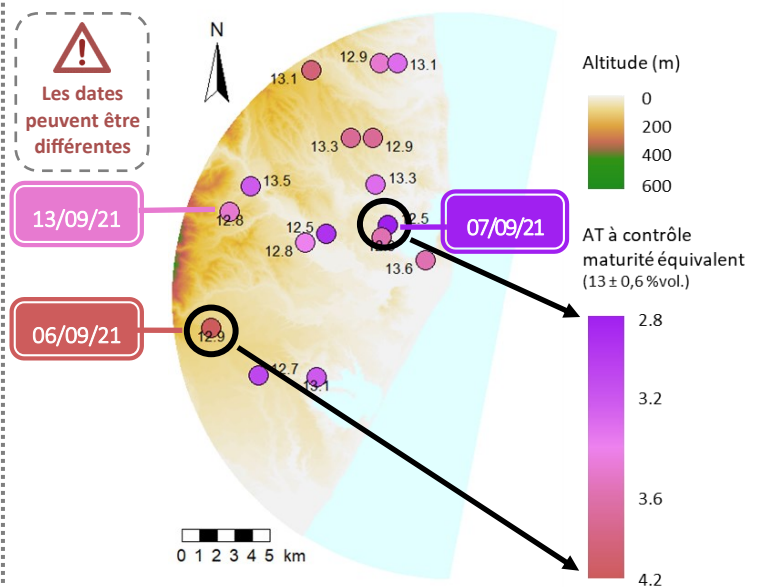
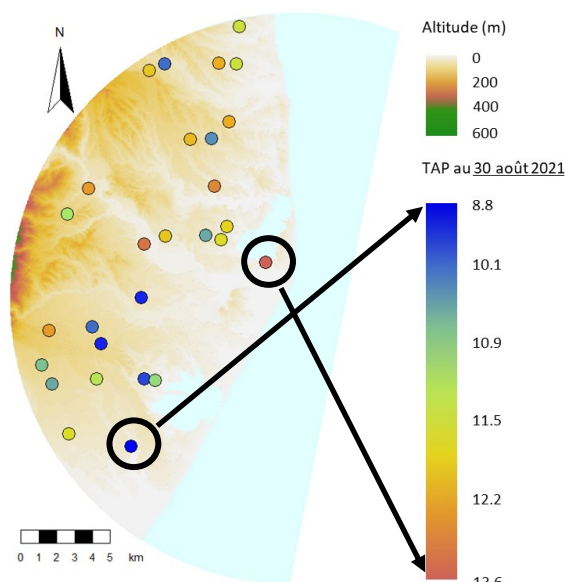
Globalement, la cinétique de chargement en sucres à partir de la véraison, est la même quel que soit le millésime (fig. 20).

Seul le millésime 2020 présente un chargement plus lent. Il est, pour l'heure, difficile de donner une explication à ce chargement moins rapide en 2020 même si le millésime a été marqué par une pression cicadelle verte importante.

Fig 20. Dynamique de chargement en sucre des baies à partir de la mi-véraison pour les millésimes 2019 à 2023

A date équivalente, (30/08/21) les TAP peuvent présenter **plusieurs points d'écart selon la zone** de la plaine (4.8 %vol. en 2021)

A TAP équivalent, (12.5 - 13.6 % vol.) les AT présentent des **différences selon la zone** de la plaine (1.4 g/L H₂SO₄ en 2021)



Les caractéristiques physiques et chimiques des baies peuvent être mises en lien avec diverses conditions de culture, un bilan des 5 années d'expérimentation a été établi (fig. 20).

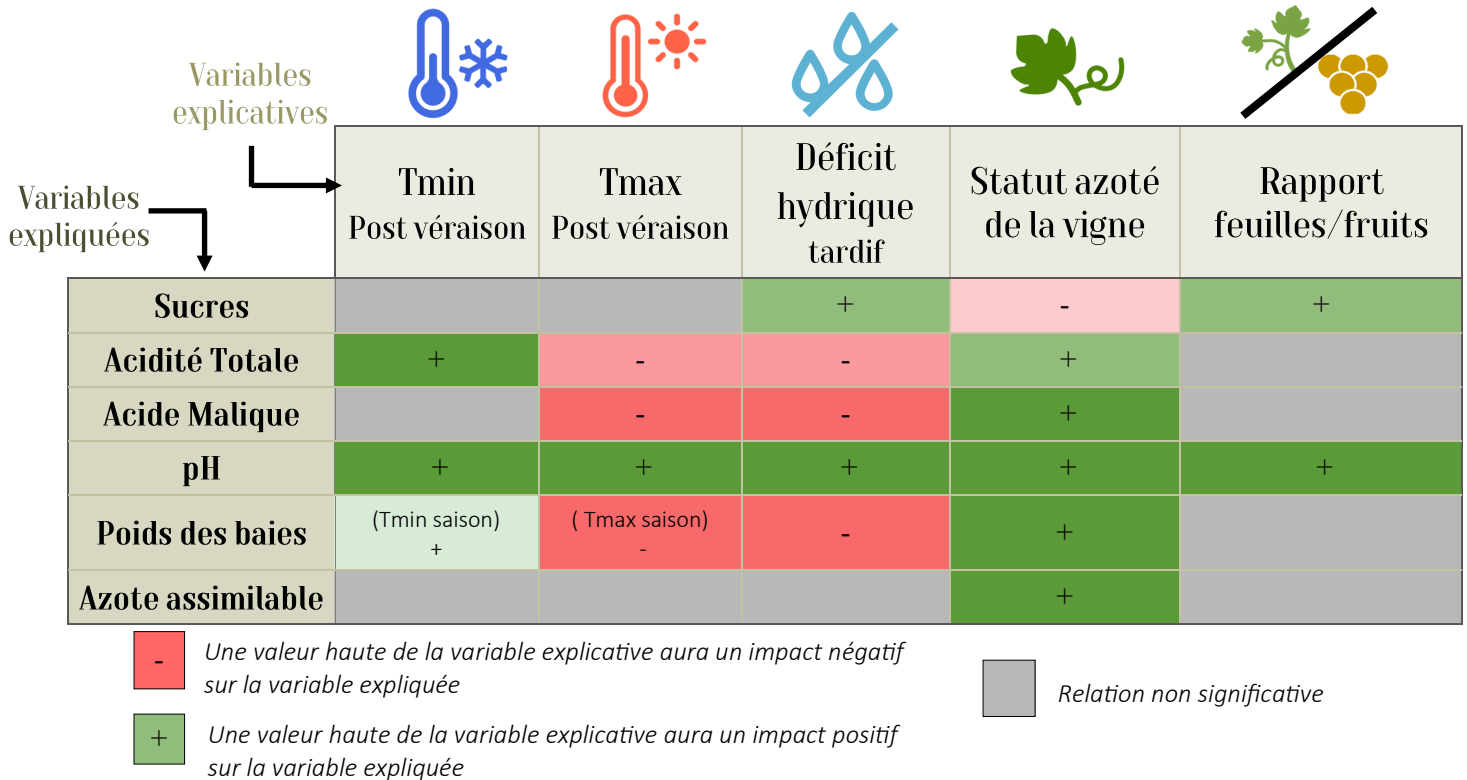


Fig 21. Relations entre les facteurs environnementaux et agronomiques et la composition des baies

L'alimentation azotée de la vigne est le paramètre qui impacte le plus la composition des baies. Plus cette nutrition azotée sera importante, plus les baies seront acides et grosses et moins elles seront sucrées.

Comme démontré lors d'autres études, nos recherches ont confirmé qu'une nutrition azotée suffisante sera gage d'une bonne concentration en azote assimilable des raisins, indispensable à la fermentation alcoolique.

Une **contrainte hydrique tardive** (après la véraison) est favorable à l'accumulation des sucres mais défavorable au maintien des caractéristiques acides des baies ainsi qu'au poids des baies.

Les **températures nocturnes** et **diurnes** n'impactent pas de la même manière les composants des baies. Les températures journalières élevées entraîneront une diminution des paramètres d'acidité (acidité totale et acide malique).

Le **rapport feuilles/fruits représente**, par cep, la **densité de feuillage par rapport à la quantité de raisin** (m^2/kg), il évalue la notion d'équilibre physiologique duquel découle le **potentiel de maturation** et donc la **qualité des raisins**. Dans d'autres régions viticoles du sud de la France, il a été établi que le ratio doit avoisiner $1 m^2/kg$ pour les cépages blancs. Pour les parcelles suivies dans le cadre de cette étude, suivant les années, ce ratio varie de 0.2 à $2 m^2/kg$. On observe ici que le rapport feuilles/fruits impacte l'accumulation des sucres ainsi que les valeurs de pH dans les baies.

D'autres facteurs, encore inexplorés à ce jour, peuvent affecter la composition des baies.

CE QU'IL FAUT RETENIR - Maturité

- Les vitesses d'accumulation des sucres et de dégradation des acides dans les baies varient selon les millésimes. Certaines conditions climatiques peuvent entraîner des déséquilibres, c'est le cas de 2022 (millésime très chaud et sec) qui présentait des caractéristiques acides particulièrement basses.
- La **maturité diffère selon les parcelles** :
 - Pour une même date, certaines parcelles sont plus chargées en sucre que d'autres.
 - Pour un même TAP, les acidités totales sont différentes d'une parcelle à l'autre.
- Ces **différences** sont en partie **expliquées par les facteurs climatiques et agronomiques** :
 - Une **forte alimentation azotée** freinerait l'avancée de la maturité mais favoriserait une taille des baies importante et une bonne fermentescibilité des moûts
 - Des **températures journalières élevées** favoriseraient la dégradation de l'acidité.
 - Une **contrainte hydrique tardive** serait défavorable au maintien de l'acidité des raisins.

6. Vinifications



Afin de définir l'expression aromatique des vins de Vermentinu issus de divers contextes de terroir, 6 parcelles ont été sélectionnées depuis 2021 pour la réalisation de vinifications en conditions expérimentales.

Les raisins suivent un itinéraire de vinification en blanc « classique ».

6.1. Caractéristiques des parcelles vinifiées

Les parcelles ont été choisies en fonction de leur **conditions climatiques** et de la **présence éventuelle d'un déficit hydrique**. Cependant, il est important de noter que les **itinéraires de culture de chacune des parcelles sont différents** (fig. 22). Certaines de ces caractéristiques sont légèrement variables suivant les millésimes.

Parcelle	Classe climatique	Alimentation hydrique	Contrainte hydrique	Année de plantation	Densité de plantation	Type de taille	Rendement
AGH09	Très chaud	Pluviométrie	Faible à modérée	2002	4000 pieds/ha	Cordon	3.10 kg/cep
AGH22		Pluviométrie	Absence	1990	3600 pieds/ha	Cordon	2.40 kg/cep
ANTI02	Grande amplitude : frais la nuit, chaud la journée	Pluviométrie + irrigation	Absence	2010	4000 pieds/ha	Guyot double	3.90 kg/cep
ANTI04		Pluviométrie	Faible	2012	5600 pieds/ha	Cordon	1.67 kg/cep
TAL01		Pluviométrie	Faible à modérée	2005	3330 pieds/ha	Cordon	1.60 kg/cep
AGH17	Frais	Pluviométrie	Absence	2010	3330 pieds/ha	Guyot double	6.80 kg/cep

caractéristiques pour l'année 2022

Fig 22. Caractéristiques climatiques, hydriques et physiologiques des parcelles vinifiées

6.2. Tendances des millésimes



2021

Le printemps gélif suivi d'un été sec et d'attaques de la pyrale des agrumes ont eu un effet négatif sur la quantité de récolte. Néanmoins la qualité de récolte était au rendez-vous avec une belle finesse des arômes et un équilibre acidité/alcool harmonieux.



2022

Le millésime a été marqué par une sécheresse dès le printemps et des pluies intenses au moment de la récolte. Les Vermentinu présentait des taux d'acidité bas, en particulier pour l'acide malique, et de faibles teneurs en azote assimilable entraînant parfois des fermentations languissantes.

Les parcelles sont récoltées à **maturité équivalente**, à l'exception de la dernière parcelle qui a dû être récoltée précocement en raison de la dégradation rapide de l'état sanitaire des raisins.

Il peut y avoir près d'un mois d'écart entre la première et la dernière parcelle récoltées.

Les teneurs en azote assimilable différant selon les moûts, une **complémentation** avec de l'azote organique est appliquée afin de les ramener à des valeurs équivalentes.

Caractéristiques moyennes des moûts		
	2021	2022
TAP (% vol.)	12.7 (±0.9)	12.4 (±0.5)
AT (g/l H ₂ SO ₄)	3.72 (±0.65)	3.40 (±0.40)
pH	3.42 (±0.1)	3.46 (±0.13)
Date de récolte	Du 26/08 au 21/09	Du 24/08 au 16/09

Afin de caractériser l'altération biologique des baies des parcelles vinifiées, l'acide D-gluconique (AG) a été mesuré sur moût.

En 2022, 3 parcelles dépassent la valeur seuil d'AG (fig. 23).

Il a été mis en évidence qu'une **alimentation azotée trop importante** (mesurée par l'appareil N-tester) conduit à une **dégradation de la qualité de la récolte**, même s'il est admis qu'une bonne alimentation azotée de la vigne est gage d'une meilleure alimentation hydrique et d'une bonne fermentescibilité.

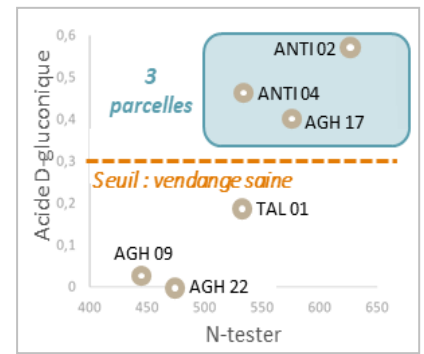


Fig 23. Relation acide D-gluconique et alimentation azotée en 2022

6.3. L'analyse sensorielle

Pour chaque millésime vinifié, les 6 vins sont dégustés en comparaison par un jury composé de sujets experts, 5 mois après leur mise en bouteille. Cette dégustation permet de qualifier le profil sensoriel de chaque vin, via la notation de 24 descripteurs adaptés à la dégustation de vins blancs secs.

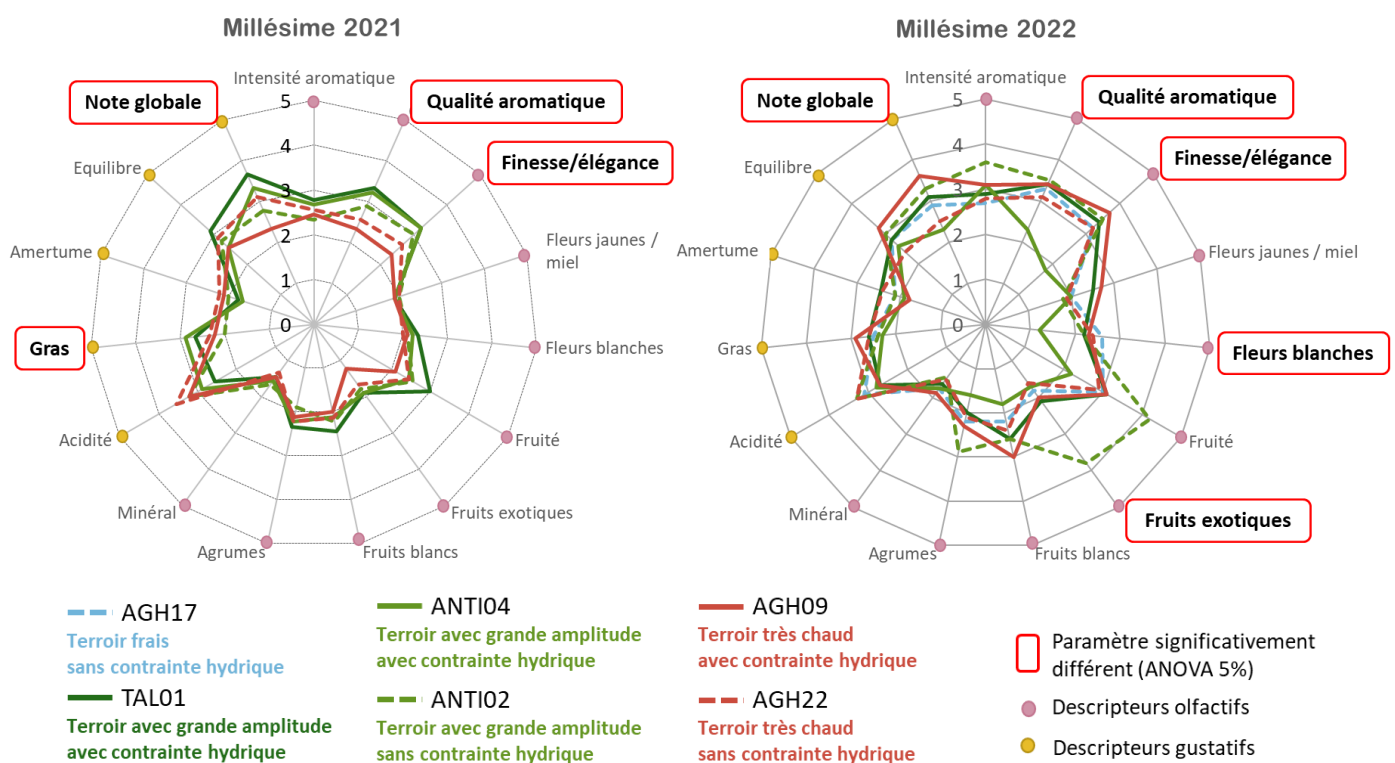


Fig 24. Graphiques radars de la moyenne des notes de chaque vin pour chaque descripteur

- 15 descripteurs sont représentés sur les graphiques radars ci-contre (fig. 24). Les paramètres significativement différents entre les vins (encadrés en rouge) sont relatifs aux caractéristiques générales des vins.
- 3 paramètres significativement différents sont communs aux deux millésimes.
- Il est actuellement difficile d'établir des tendances générales entre ces deux millésimes. Certains vins ont été plus appréciés que d'autres.
- Les relations potentielles entre ces descripteurs et les paramètres agronomiques et climatiques (teneur en azote, rapport feuilles/fruits, température...) seront explorées prochainement, trois millésimes *a minima* sont nécessaires.

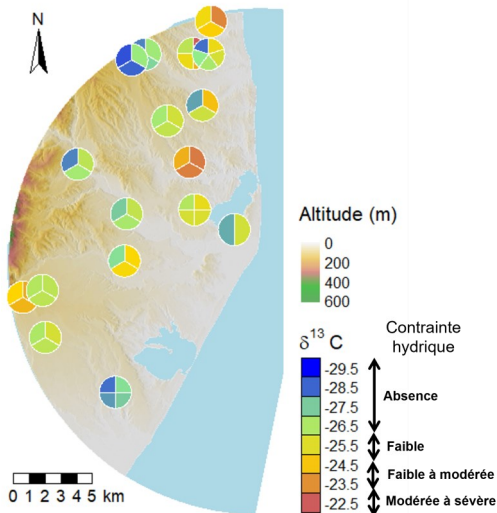
CE QU'IL FAUT RETENIR - Vinifications

- Les critères de discrimination retenus pour le choix des parcelles vinifiées depuis 2021 sont la classe climatique et la présence ou non d'une contrainte hydrique. Les parcelles sont récoltées à une maturité équivalente.
- Nos mesures ont démontré qu'une **fertilisation azotée excessive peut être préjudiciable à la qualité sanitaire de la récolte**.
- Pour le moment il n'y a **pas de profil organoleptique établi pour chaque classe de parcelles**.
- **Trois millésimes sont nécessaires pour relier les dégustations aux paramètres climatiques et agronomiques**

7. Pour aller plus loin

7.2. Contrainte hydrique ressentie par le Vermentinu

Afin de **caractériser la contrainte hydrique** subie par la vigne durant la maturation, des **analyses de Delta 13C** ($\delta^{13}C$) sont réalisées sur les sucres du moût. La **discrimination isotopique du carbone** (^{12}C et ^{13}C) permet d'identifier s'il y a eu une **fermeture des stomates des feuilles de la vigne** (afin de réduire l'évaporation de l'eau) et renseigne donc sur l'éventuel stress ressenti par cette dernière sur la période de maturation. **Plus la valeur de $\delta^{13}C$ est négative, plus le déficit hydrique est faible**. Cette contrainte hydrique n'est pas toujours homogène sur l'ensemble de la parcelle (fig. 25).



Seules les parcelles non irriguées, au nombre de 17, sont traitées dans ce paragraphe. Malgré des millésimes qui se suivent mais qui ne se ressemblent pas d'un point de vue climatique (température et pluviométrie), la contrainte hydrique estimée pour chacune des parcelles semble très peu varier d'une année sur l'autre.

Lors du millésime 2022, très chaud et sec, 6 parcelles n'ont pas subi de stress hydrique. Les 11 autres parcelles présentaient une contrainte hydrique modérée et localisée à certaines zones (classe : *faible* - 6 parcelles, *faible à modérée* - 4 parcelles, *modérée à sévère* - 1 parcelle).

La forte proportion de parcelles ne présentant pas ou très peu de déficit hydrique, laisse développer l'hypothèse qu'il existe une **bonne adéquation et adaptation du cépage Vermentinu avec les différents terroirs en côte orientale**.

Fig 25. Valeur de $\delta^{13}C$ pour chaque zone étudiée des parcelles - 23 août 2022

7.1. Vermentinu et adaptation climatique

Afin d'identifier **quel cépage serait le plus adapté dans le cadre du changement climatique**, des chercheurs (Parker et al. 2013) ont mis en place un modèle permettant de comparer l'atteinte des stades phénologiques (floraison et véraison) pour divers cépages en se basant sur la somme des températures à partir du 60^{ème} jour de l'année.

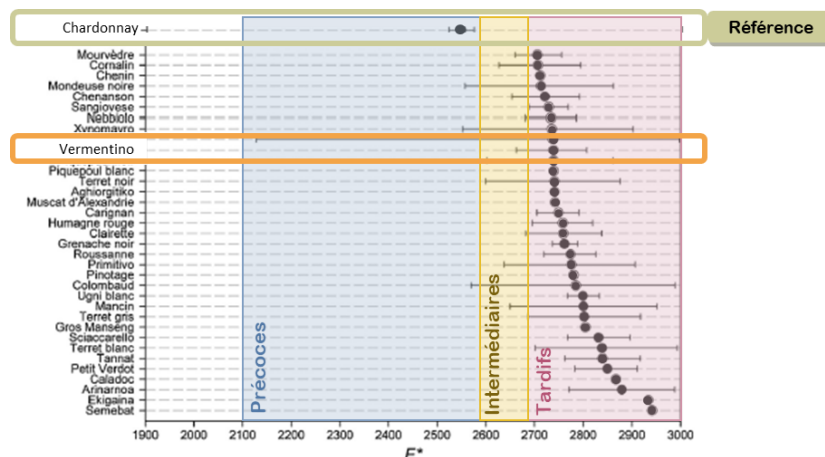


Fig 26. Valeur F^* (Σ de température) nécessaire pour atteindre le stade véraison pour les cépages tardifs. Source : Parker et al. 2013 - adapté par le CRVI

Le **Vermentinu fait partie des cépages tardifs** (fig. 26), qui nécessitent une importante somme de températures pour atteindre le stade véraison. Sur les 104 cépages étudiés (blancs et noirs), 79 cépages sont plus précoces à la véraison que le Vermentinu. La somme de températures nécessaire à la véraison définie lors de cette étude a été confirmée avec les données du programme Terroir.

Le **Vermentinu est donc l'un des cépages les plus adaptés aux conditions climatiques méditerranéennes**, où la somme des températures est importante. Attention, certains cépages originaires d'autres pays méditerranéens (Grèce, Espagne...) n'ont pas été recensés lors de cette étude. Le **caractère tardif ne peut pas être résumé qu'à la quantité de chaleur nécessaire à l'atteinte de la véraison**, en effet ce potentiel de tardivité peut être impacté par d'autres paramètres tel que la contrainte hydrique.

8. Conclusion

Le contexte

L'augmentation des températures, du déficit hydrique et de la teneur en CO₂ de l'atmosphère sont les conséquences du changement climatique. Ces dérèglements entraînent de multiples modifications de la physiologie de la vigne en particulier un avancement des stades phénologiques et notamment de la maturité. La composition des baies s'en trouve altérée, les baies sont plus sucrées, moins acides et plus petites. Le potentiel aromatique est lui aussi impacté.

Certains résultats ont déjà été démontrés lors d'autres études, cependant il semblait indispensable de les confirmer dans un contexte méditerranéen et insulaire. D'autant plus qu'en conditions climatiques chaudes et pour une réserve hydrique des sols faible, l'effet du millésime sur les différentes variables est très fort.

Les résultats de l'étude menée par le CRVI

En dépit de l'étroitesse de la zone étudiée (rayon de 15 km), la plaine située en côte orientale, offre une **grande diversité de terroirs**, d'un point de vue :

- ♦ **Pédologique** : les sols des parcelles présentent des caractéristiques variables en termes de texture, structure, profondeur, alimentation en eau, pierrosité, teneur en éléments minéraux qui leur confèrent des potentialités agronomiques différentes.
- ♦ **Climatique** : la localisation des parcelles (altitude, distance à la mer) ainsi que leurs caractéristiques topographiques (pente, exposition) engendrent pour chacune d'entre elles, des conditions climatiques différentes (température, pluviométrie, vent). D'autant plus que les températures nocturnes et diurnes ne suivent pas les mêmes dynamiques.
- ♦ **Phénologique** : les températures qui règnent sur chaque parcelle impactent fortement les différents stades phénologiques et donc la précocité de la maturité et en partie la composition des baies.
- ♦ **Pratiques culturales** : les itinéraires techniques suivis par les viticulteurs (alimentation azotée et hydrique, densité de végétation...) sont différents et entraînent également divers équilibres physiologiques de la vigne et donc de la composition des baies.

Les vins de Vermentinu qui sont issus de ces différents terroirs présentent des **caractéristiques organoleptiques multiples et singulières** même si, pour l'heure, il n'est pas envisageable d'associer des caractéristiques organoleptiques pour chaque type de terroir.

Pour finir

Le cépage Vermentinu présente une **bonne adéquation aux différentes catégories de terroirs identifiées** et une **capacité plutôt satisfaisante d'adaptation face aux traumatismes du changement climatique**.

La culture du Vermentinu est **adaptée aux conditions climatiques actuelles** et offre de **belles perspectives quant au maintien de la productivité** du Vermentinu en conditions insulaire.

♦ Poursuites de l'étude



Les multiples cartes présentées dans ce document vont prochainement être **mises en ligne** sur le site du CRVI. Ces **cartes interactives** permettront de visualiser pour chaque parcelle, située dans la zone Linguizzetta - Ghisonaccia, leurs caractéristiques pédologiques, climatiques et phénologiques.

La seconde étape de ce projet est de déterminer les possibles **évolutions climatiques de la côte orientale pour les décennies à venir**, suivant les scénarios définis par le GIEC. Ces projections permettront de cibler les **répercussions sur le développement du Vermentinu** mais également d'identifier les zones de plantation propice à la culture du Vermentinu dans ce contexte de réchauffement climatique.

Le CRVI tient à remercier les viticulteurs partenaires de ce réseau dont la collaboration permet la réalisation de cette étude.

M. André Casanova
M. Eric Ewald
M. Simon Pierre Fazi
M. Jean Baptiste Finidori
M. Laurent Gambini
M. Pierre Garcia
M. Jérôme Girard

M. Christophe Lavergne
Mme Josette Lucciardi
M. Alain Lugarini
M. Jean Mondange
M. Joseph Nicolai
M. Christian Orsucci
M. François Paoli

M. Eric Poli
M. Roger Pouyau
Mme Emilie Raffalli
M. François Ramazotti
M. Ange Marie Robinet
M. Dumè Salvadori
Mme Josée Vanucci Couloumere



Centre de Recherche
Viticole de Corse

CENTRU DI RICERCA
VITICULA DI CORSICA

Ce document a été livré en janvier 2024 par U Centru Di Ricerca Viticula Di Corsica (CRVI)

Ont rédigé ce document :

Amélie LAMBERT, Chargée de missions, en charge du programme pour la partie collecte des données

Fanny ANDRE, Ingénieure agronome et œnologue, en charge du programme pour la partie micro-vinifications

Nathalie USCIDDA, directrice de la publication



Les données collectées par le CRVI sont analysées statistiquement par la cellule de transfert

VITINNOV, représentée par :

Lauren INCHBOARD, Biostatisticienne

Julia Gouot, Chargée de projet R&D

Diala YOUNES LAVENU, Directrice de la cellule



Programme de recherche financé par **FranceAgriMer**



L'ensemble de l'équipe du CRVI a participé à ces travaux :

Gabrielle CICCOLINI, Ingénieur en charge du matériel végétal

Caroline DE PERETTI, Responsable Qualité du Laboratoire COFRAC

Ange Pierre MICHELANGELI, Responsable des analyses du laboratoire COFRAC

Florence RAFFINI, Secrétaire - Comptable

Gilles SALVA, Directeur Pôle végétal

Nathalie USCIDDA, Directrice Générale

Damien ZANARDO, Technicien viti-œno

Présidente : Josée VANUCCI-COULOUMERE



crvi_corse



CRVI



Caractérisation et valorisation des terroirs viticoles d'une zone de l'AOP Corse (Linguizzetta – Ghisonaccia)

Analyse bilan 2018 – 2023

Rapport statistique

Analyse bilan : Programme Terroir CRVI 2018-2023

Lauren Inchboard (Vitinnov)

2023-11-08

Table des matières

Table des figures	4
Liste des tableaux	5
1 Introduction	6
1.1 Contexte et point bibliographique	6
1.2 Réseau du Programme Terroir	7
1.3 Bilan des données disponibles pour le Programme Terroir	9
1.3.1 Dispositif observationnel	9
1.3.2 Données de phénologie	9
1.3.3 Nombre de contrôles maturité	10
1.3.4 Bilan rendement	10
2 Objectif 1 : Caractériser la variabilité climatique de la zone d'étude	11
2.1 Caractérisation du climat global par millésime de l'étude	11
2.1.1 Diagrammes ombrothermiques	11
2.2 Variabilité temporelle des températures	11
2.2.1 Caractérisation des millésimes	11
2.2.2 Variabilité inter-millésime capteur à capteur	15
2.2.3 Variabilité intra-journalière	17
2.3 Variabilité spatiale des températures	20
2.3.1 Modélisation des indices de température	21
2.4 Impact de la topographie sur la structuration des températures	26
2.4.1 Etude des colinéarités entre distance à la mer et altitude (sur les données prises sur la saison) :	26
2.4.2 Méthodologie et protocole de modélisation	26
2.4.3 Bilan de la modélisation en fonction de la topographie, par indice et par période	27
2.5 Bilan de l'objectif 1 : caractérisation de la variabilité climatique	29

3	Objectif 2 : Améliorer la connaissance du cépage Vermentinu dans les différentes situations de terroir	30
3.1	Description du comportement du Vermentinu entre millésimes	30
3.1.1	Stades phénologiques	30
3.1.2	Alimentation en azote	32
3.1.3	Déficit hydrique	33
3.1.4	Maturité technologique des baies	37
3.1.5	Quantité de vendange	41
3.2	Ajustement de modèles phénologiques	43
3.3	Structuration des jeux de données écophysio au cours des millésimes par analyse factorielle multiple (AFM)	45
3.3.1	Cercle des corrélations	45
3.3.2	Projection des individus	45
3.3.3	Interie intra-placettes	49
3.4	Modélisation de la vitesse de maturation	50
3.5	Modélisation du niveau final de maturation	54
3.5.0.1	Sucres :	54
3.5.0.2	Acidité totale :	55
3.5.0.3	Acidité malique :	55
3.5.0.4	pH :	55
3.5.0.5	Rapport sucre sur acides :	55

Table des figures

1	Carte de la zone d'étude terroir dans la plaine orientale Corse avec les 31 parcelles du réseau. L'altitude est représentée en fond de la carte.	8
2	Courbes de température moyenne par millésime.	12
3	Boîtes à moustache des moyennes des températures minimales et températures maximales journalières calculés sur le réseau de capteurs pour chaque millésime, du 1er avril au 30 septembre.	13
4	Boîtes à moustache des moyennes des températures minimales et températures maximales journalières calculés sur le réseau de capteurs pour chaque millésime, du 1er avril au 30 septembre.	14
5	Variance des températures minimales entre millésimes : température minimale moyenne par capteur et par millésime, et distribution de sa variance.	15
6	Carte de la variance observée sur les températures minimales moyennes entre 2019 à 2023.	16
7	Courbes de l'amplitude thermique diurne (DTR) entre le 1er avril et le 30 septembre, moyenné par millésime.	17
8	Boîtes à moustaches des amplitudes de températures journalières moyennes entre 2018 et 2023.	18
9	Courbes représentant l'amplitude thermique journalière sur les parcelles microvinifiées en 2022.	18
10	Carte des DTR (diurnal temperature range) moyennées entre le 1er avril et le 30 septembre de 2019 à 2023, modélisées par SVM.	19
11	Courbes de l'amplitude thermique journalière (DTR) et vitesse du vent enregistrés sur les 7 parcelles équipées de station météo en 2022.	20
12	Boîtes à moustaches des amplitudes de températures minimales et maximales observées sur le réseau entre 2018 et 2023.	21
13	Carte des températures minimales moyennes entre le 1er avril et le 30 septembre de 2019 à 2023, modélisées par SVM.	22
14	Carte du nombre de jours sur la saison au-dessus de 35°C de 2019 à 2023, modélisées par SVM.	25
15	Histogramme des effets aléatoires parcelle dans le modèle expliquant les températures minimales sur la saison : anomalies de température par parcelle.	28
16	Dates de mi-débourrement observées sur le réseau de 2020 à 2023 (effectifs montrés à droite).	30
17	Dates de mi-floraison observées sur le réseau de 2018 à 2023 (effectifs montrés à droite).	31
18	Dates de mi-véraison observées sur le réseau de 2018 à 2023.	31
19	Relations entre mesures de azote assimilable et Ntester par millésime.	32
20	Distribution des teneurs en azote assimilable par millésime (à gauche) et liens entre valeurs par placette (à droite).	33
21	Indice d'arrêt de croissance (%) estimée à la date de mi-véraison de la placette, par millésime.	34
22	Distribution des valeurs de $\delta^{13}C$ par millésime (à gauche) et liens entre valeurs par placette (à droite).	34
23	Evolution de l'arrêt de croissance évaluée par placette et lien avec le $\delta^{13}C$ mesuré en fin de saison.	35
24	Relations brutes entre le taux d'arrêt de croissance estimé à mi-véraison et 1) l'azote foliaire, 2) la pratique de l'irrigation et 3) le $\delta^{13}C$ mesuré en fin de saison (à titre informatif).	36
25	Dynamiques d'accroissement du poids de 100 baies par millésime.	37
26	Dynamiques de chargement en sucres par millésime.	38
27	Dynamiques de dégradation des acides par millésime.	38
28	Dynamiques de dégradation des acides maliques par millésime.	39
29	Dynamiques d'augmentation du pH par millésime.	40

30	Dynamique d'accroissement du rapport SR/AT.	40
31	Dynamique d'accroissement du rapport SR/AT.	41
32	Relations linéaires entre rendement moyen au cep et âge de la parcelle par millésime.	42
33	Sommes de température recensées à la mi-floraison et à la mi-véraison en 2022.	43
34	Sommes de température recensées lors de l'accumulation de 180g et 200g de sucres, avec le nombre de placettes concernées par l'estimation.	44
35	Cercle des corrélations de l'analyse factorielle mutiple affichée par groupe sur le premier plan factoriel : chaque millésime de 2018 à 2023 et les variables de topographie incluses en variables supplémentaires.	46
36	Projections globales (en noir) et partielles (par millésime, en couleur) des individus de l'AFM.	47
37	Projections partielles par millésime des placettes dans l'AFM en fonction du rendement mesuré sur la placette.	48
38	Projections par millésime des placettes dans l'AFM en fonction de l'âge de la vigne.	48
39	Projections par millésime des placettes dans l'AFM en fonction de l'âge de la destination.	49
40	Maturation SRAT en fonction de la somme des températures depuis le 1er avril.	50
41	Maturation SRAT en fonction de la somme des températures depuis mi-véraison.	51
42	Distributions des vitesses de maturation par millésime, calculées en fonction du temps réel et du temps thermique.	51

Liste des tableaux

1	Taille du dispositif	9
2	Nombre d'observations de la phénologie de la vigne	9
3	Nombre de contrôles maturité	10
4	Evaluation de la charge	10
5	Somme des températures moyennes entre le 1er avril et le 30 septembre (en °C)	12
6	DTR moyens observées sur les parcelles microvinifiées en 2022	20
7	Résultats de la modélisation des indices de température en fonction des facteurs de topographie : part de variance expliquée par l'altitude, la distance à la mer, les expositions, la latitude, le millésime et la parcelle. La notation ns signifie que le facteur n'impacte pas significativement la variable réponse (probabilité limite de 5%).	27
8	Résultats de la modélisation des deux vitesses de maturation en fonction des facteurs de terroir : parts de variance expliquée par la température moyenne et l'amplitude thermique moyennes durant la maturation, le poids des baies, le $\delta^{13}C$, l'azote assimilable des baies et de la surface externe du couvert végétal, ainsi que les facteurs non quantifiés de la parcelle et le millésime. La notation ns signifie que le facteur n'impacte pas significativement la variable réponse (probabilité limite de 5%).	52
9	Résultats de la modélisation des paramètres de maturation en fonction des facteurs de terroir : parts de variance expliquée par la température minimale moyenne et la température maximale moyenne durant la maturation, le poids des baies, le $\delta^{13}C$, l'azote assimilable des baies, la surface externe du couvert végétal et de l'arrêt de croissance à mi-véraison, puis les facteurs non quantifiés de la parcelle et le millésime. La notation ns signifie que le facteur n'impacte pas significativement la variable réponse (probabilité limite de 5%).	54

1 Introduction

Ce document recense les analyses effectuées par Vitinnov sur le jeu de données du Programme Terroir 2018 - 2023 du CRVI Corse. Cette analyse finale a pour objectifs de dresser le bilan de toutes les données récoltées depuis le début du programme Terroir et de préparer des nouveaux axes et perspectives de travail visant à valoriser les acquis à destination des viticulteurs et des scientifiques.

Les objectifs scientifiques du Programme Terroir 2018-2023 sont :

- la caractérisation de la variabilité climatique de la plaine orientale Corse,
- l'étude de la réponse de la vigne au climat sur plusieurs millésimes,
- la caractérisation et hiérarchisation des facteurs qui influencent la qualité des raisins

1.1 Contexte et point bibliographique

Deux risques majeurs du changement climatique pour la viticulture à l'échelle mondiale ont été identifiés par *Duchêne 2016 (How can grapevine genetics contribute to the adaptation to climate change ?)* :

- l'écroulement des rendements causé par l'indisponibilité en eau,
- la production de vins peu équilibrés à cause des hautes températures (manque de fraîcheur et d'expression aromatique).

En effet, il est aujourd'hui admis que, sous l'effet du dérèglement climatique, la phénologie de la vigne sera naturellement accélérée, de manière variable en fonction des cépages et des localisations. Dans le Programme Terroir, nous étudions le cépage blanc Vermentino, endémique de la Corse et dont le CRVI souhaiterait promouvoir la plantation, puisque ce cépage est intéressant d'un point de vu qualitatif. D'après *García Aturi de Cortazar 2016 : Grapevine phenology in France : from past observations to future evolutions in the context of climate change*, le Vermentino fait partie de la classe intermédiaire en phénologie (comme la plupart des cépages). Ce papier montre que, pour cette classe de cépages, chaque degré de température moyenne additionnelle provoquera une avancée de la floraison de 8 jours en moyenne. Dans ce contexte, les leviers cités par l'auteur pour retarder la phénologie de la vigne sont :

- le ratio feuille/fruit,
- l'adaptation du matériel végétal : clones plus tardifs, porte-greffe...,
- l'effet ombrage (bâchage des vignes...),
- l'utilisation de retardants chimiques.

Afin de prédire l'avancement de la phénologie, divers modèles basés sur des sommes de température existent pour extrapoler l'impact de la hausse des températures. Le modèle GFV décrit dans *Parker 2013 : Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modelling approach : A case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L.* permet de prédire des dates de floraison et de véraison grâce à des sommes de température cumulée depuis le 60ème jour de l'année. Le modèle est calibré par cépage, et il a été calibré pour le Vermentino sur très peu d'observations. **Ce modèle sera exploité sur les données du Programme Terroir.**

L'avancée de la phénologie provoquer évidemment une avancée de la période de maturation. Grâce au même formalisme de sommation thermique (depuis le jour 91), il existe un modèle de prévision d'une certaine quantité de sucres, explicité dans *Parker 2020 : Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of *Vitis vinifera* L. cultivars*. Cette publication montre que le résultat de ce modèle est moins précis que pour la phénologie, puisque l'accumulation en sucres subit une influence plus forte de la disponibilité en eau et en l'azote.

Ce modèle fera l'objet d'une calibration pour le Vermentino dans ce rapport, et nous étudierons l'impact de l'eau et de l'azote sur les résidus de ce modèle.

De nombreuses publications montrent que la phénologie de la vigne est sensible à des variations locales de température, provoquées par des facteurs de topographie à l'échelle d'une appellation viticole. Cela a été montré sur les appellations Saint Emilion et Pomerol grâce à *De Rességuier 2020 : Temperature variability at local scale in the Bordeaux area. Relations with environmental factors and impact on vine phenology*.

L'impact des facteurs de topographie sur la structuration des températures, sur la saison et sur des périodes clefs, sera étudié grâce aux six millésimes de récolte de données.

Ces nouvelles conditions climatiques en période de maturation des baies peuvent donc impacter la qualité technologique des baies, et même provoquer une maturation chaotique. La publication *Bécart 2022 : Assessment of changes*

in Grenache grapevine maturity in a Mediterranean context over the last half-century) a entrepris d'analyser un jeu de données historique concernant le Grenache pour comprendre les facteurs climatiques ayant une influence sur sa maturité technologique, à partir de données climatiques modélisées. Leur analyse statistique a montré que :

- l'acidité totale des moûts est sensible aux températures durant la période de maturation et au déficit hydrique entre le débourrement et la floraison, donc en début de saison : l'hypothèse derrière ce résultat est qu'un déficit hydrique en début de saison peut affecter la taille de la canopée et par conséquent l'assimilation de potassium ce qui peut provoquer une faible acidité. Il faut cependant garder en tête qu'un excès de potassium peut aussi provoquer des dépôts et conduire à une baisse d'acidité. **Nous allons donc bien distinguer les déficits hydriques précoces et tardifs survenus pendant la saison lors de l'étude des acidités des moûts.**
- la quantité de sucre est sensible au déficit hydrique précoce et au nombre de jours de pluie en fin de saison ; d'autre part les températures élevées vont accélérer l'accumulation des sucres et provoquer une concentration des sucres au sein des baies liée à la perte par évapotranspiration.
- le poids des baies est sensible au nombre de jours de pluie en fin de saison et aux températures en milieu de saison.

L'ensemble des indicateurs climatiques étudiés ne sont pas disponibles dans le cadre de l'étude Terroir, mais des indicateurs s'y rapprochant seront utilisés afin d'étudier le concordance ou non de ses résultats sur notre réseau.

Un autre aspect de la maturation qui peut être étudié est la dynamique de maturation, comme cela a été proposé par *Van Leeuwen 2023 : An operational model for capturing grape ripening dynamics to support harvest decisions*. Cette analyse a montré que la vitesse de maturation (selon le rapport SR/AT) est plus sensible au millésime qu'au sol ou qu'à la variété. En effet, 41% de la variance de cette mesure est causée par le millésime, 25% à la variété et 11% au poids des baies, qui peut constituer un levier d'adaptation (des baies plus grosses ont une maturation plus lente). L'indicateur de SR/AT est d'intérêt pour étudier le profil des vins car elle intègre deux attentes des consommateurs :

- l'évolution de la quantité de sucres dans les vins est importante car les consommateurs préfèrent des vins bas en alcool,
- l'acidité doit rester à des niveaux convenables afin de garder une stabilité microbienne ainsi qu'un bon équilibre.

La vitesse de maturation et les facteurs de terroir l'impactant d'année en année seront étudiés au sein de ce rapport.

1.2 Réseau du Programme Terroir

La zone d'étude se situe dans la plaine orientale sur les communes d'Aléria, Aghione, Tallone et Ghisonaccia. Le dispositif comporte aujourd'hui 30 parcelles de Vermentinu : 20 parcelles étaient choisies en 2018, dix nouvelles parcelles ont été ajoutées au début de 2019, une parcelle arrachée en 2020 et une parcelle ajoutée en 2021. Sur chaque parcelle du réseau se trouvent un capteur de température positionné dans la végétation et protégé par un abri solaire, ainsi que 3 à 5 placettes de vigne. Le capteur de température se trouve toujours sur la placette nommée n°1 (Figure 1). La parcelle TAL07 a été arrachée mais le capteur est resté en place et a continué de fonctionner en 2022. Le type de taille a été renseigné pour chaque parcelle : 7 parcelles sont en cordon, 2 parcelles avec un mélange de cordon et de guyot simple (en transition), 11 parcelles en guyot simple et 9 parcelles en guyot double.

La zone d'étude s'étend le long de la côte sur 24 km du nord au sud et 13km d'est en ouest. Les parcelles les plus à l'est sur très proches de la mer, et les parcelles à l'ouest sont légèrement en altitude : quatre parcelles se situent entre 80 et 120m au dessus du niveau de la mer. La zone d'étude peut être décrite par sept variables topographiques de manière continue (sur des pixels 25mx25m) : les coordonnées géographiques longitude (x) et latitude (y), l'altitude, la pente, la distance à la mer (étangs exclus) et les exposition nord/sud et est/ouest. Ces variables sont obtenues à partir d'un modèle numérique de terrain.

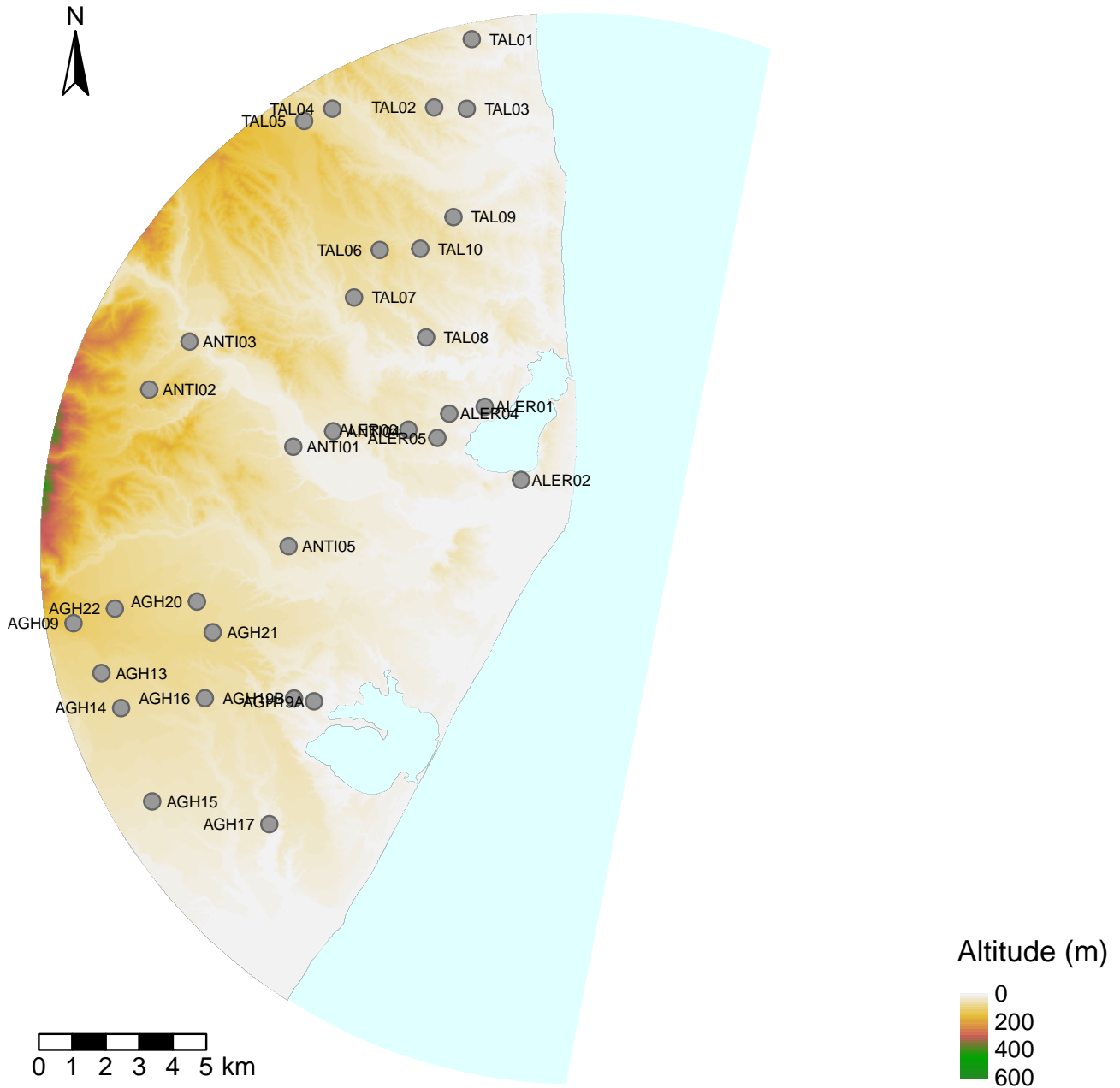


FIGURE 1 – Carte de la zone d'étude terroir dans la plaine orientale Corse avec les 31 parcelles du réseau. L'altitude est représentée en fond de la carte.

1.3 Bilan des données disponibles pour le Programme Terroir

1.3.1 Dispositif observationnel

Le réseau Terroir est composé de parcelles de vigne en production, au sein desquelles des **placettes** de vignes ont été définies pour les mesures de physiologie. Sur une placette par parcelle, un **capteur de température** enregistre les données en continu. Des parcelles ou des placettes peuvent être amenées à disparaître du réseau en cas d'arrachage des vignes, ou à être ajoutées pour compléter le dispositif.

Des capteurs TinyTag installés dans la végétation ont enregistré les données de température en continu depuis 2018. Les données horaires issues des capteurs sont retraitées selon un protocole standardisé établi par *Renan et al. (2017)* et des températures minimales et maximales journalières sont calculées. Il existe une méthodologie statistique pour imputer des données journalières manquantes ; cependant au-delà des 20% des données manquantes entre le 1er avril et le 30 septembre, le capteur est écarté par manque de fiabilité.

TABLE 1 – Taille du dispositif

	Nombre de parcelles	Nombre de placettes	Capteurs (données complètes)
2018	19	62	20
2019	28	92	26
2020	28	94	25
2021	29	94	29
2022	29	93	30
2023	29	94	29

L'effectif conséquent de capteurs à partir de 2019 a permis de spatialiser les températures à l'échelle de la plaine orientale par une méthode d'apprentissage supervisée appelée *Support Vector Machine*. Nous disposons donc, à partir de 2019, de cartes de température continue sur la zone ainsi que de températures estimées à l'échelle des placettes de vigne. Avant 2018, nous utilisons les températures observées sur les placettes n°1 uniquement.

Au cours de ce programme, les indices de température ont été considérés tantôt sur la saison de végétation telle que définie auparavant (1er avril au 31 octobre), tantôt sur la saison plus cohérente pour le contexte de production Corse (1er avril au 30 septembre). Dans le cadre de cette étude, les indices ont été recalculés afin de considérer la période du 1er avril au 30 septembre pour tous les millésimes de l'étude.

1.3.2 Données de phénologie

Les données de phénologie ont été récoltées à la placette, en ciblant le 50% d'occurrence de chaque stade (débourrement, floraison, véraison). La présence de ces données d'année en année est recensée ci-dessous :

TABLE 2 – Nombre d'observations de la phénologie de la vigne

	Mi-débourrement	Mi-floraison	Mi-véraison
2018	0	62	62
2019	0	96	92
2020	94	97	93
2021	85	94	92
2022	94	32	94
2023	94	93	91

1.3.3 Nombre de contrôles maturité

Des contrôles par placette sont effectués de manière routinière pendant la période de maturation. Le nombre de contrôles par placette fluctue : le nombre de contrôles minimal, moyen et maximal pour chaque placette est recensé ci-dessous. Pour étudier le niveau final de maturation, nous ciblons un contrôle “complet” durant la fin de la période de maturation (en observant les dynamiques d’acidité et de sucrosité). Cependant il ne faut pas prendre une date trop tardive car les parcelles les plus avancées en maturité auraient pu être vendangées. Les dates choisies pour le niveau final de maturation sont indiquées ci-dessous.

TABLE 3 – Nombre de contrôles maturité

	2019	2020	2021	2022	2023
Nombre de placettes	105	99	94	94	94
Quantité minimale	1	1	3	2	3
Quantité moyenne	4.2	6.8	5.2	5.6	5.5
Quantité maximale	6	9	7	8	7
Date commune	20/21 août	26/27 août	1/2 septembre	30/31 août	22/23 août

1.3.4 Bilan rendement

Des pesées de récolte ont été effectuées à la placette par l’équipe du CRVI, au plus proche de la date de vendange de la parcelle. Il est évidemment compliqué d’accéder à toutes les placettes à temps pendant cette période, et les vigneron peuvent aussi ne pas prévenir de la récolte : ainsi des données manquantes sont à prévoir. La table ci-dessous recense le taux de complétion des données concernant la charge par millésime.

TABLE 4 – Evaluation de la charge

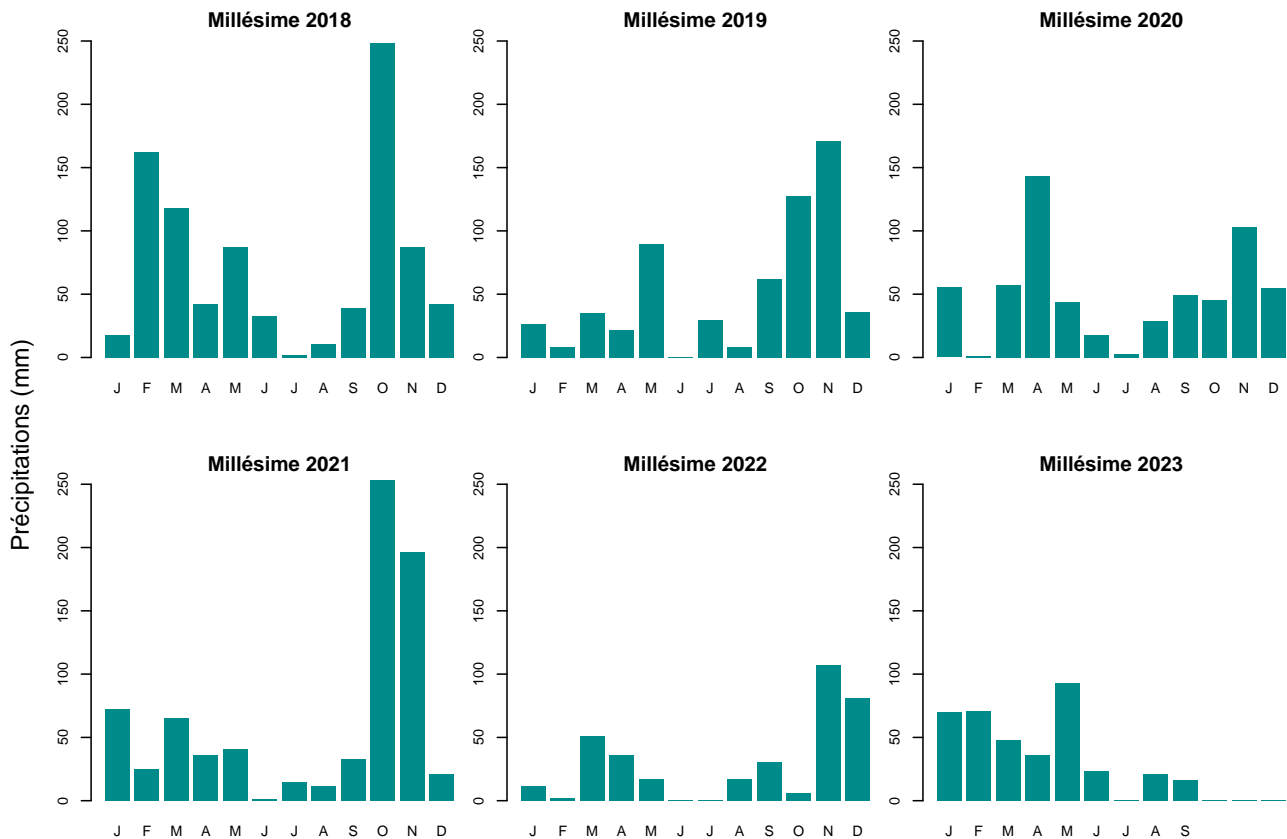
Données de rendement (%)	
2018	53.2
2019	63.4
2020	68.3
2021	81.9
2022	56.4
2023	70.2

2 Objectif 1 : Caractériser la variabilité climatique de la zone d'étude

2.1 Caractérisation du climat global par millésime de l'étude

2.1.1 Diagrammes ombrothermiques

```
## year RR
## 1 2018 888.5
## 2 2019 615.8
## 3 2020 603.6
## 4 2021 771.1
## 5 2022 359.1
## 6 2023 378.4
```



2.2 Variabilité temporelle des températures

2.2.1 Caractérisation des millésimes

La température moyenne journalière, calculée sur la population de capteurs présents pour une année donnée, nous montre l'évolution de température intra-annuelle (Figure 2). Nous comparons ces dynamiques sur le graphique ci-dessous. Nous voyons que les fluctuations d'un jour à l'autre sont parfois plus importantes que les fluctuations saisonnières. Nous remarquons notamment un mois de mai frais en 2019 et un mois de juin frais en 2020 par rapport aux autres millésimes. Le mois de mai a été particulièrement chaud en 2022 et la fin du mois de juin a été chaud en 2019.

Nous soustrayons ces températures moyennes journalières à la température moyenne tous millésimes confondus, pour étudier les écarts à la moyenne globale sur les 6 millésimes (Figure 3). Les périodes de mi-débourrement, mi-

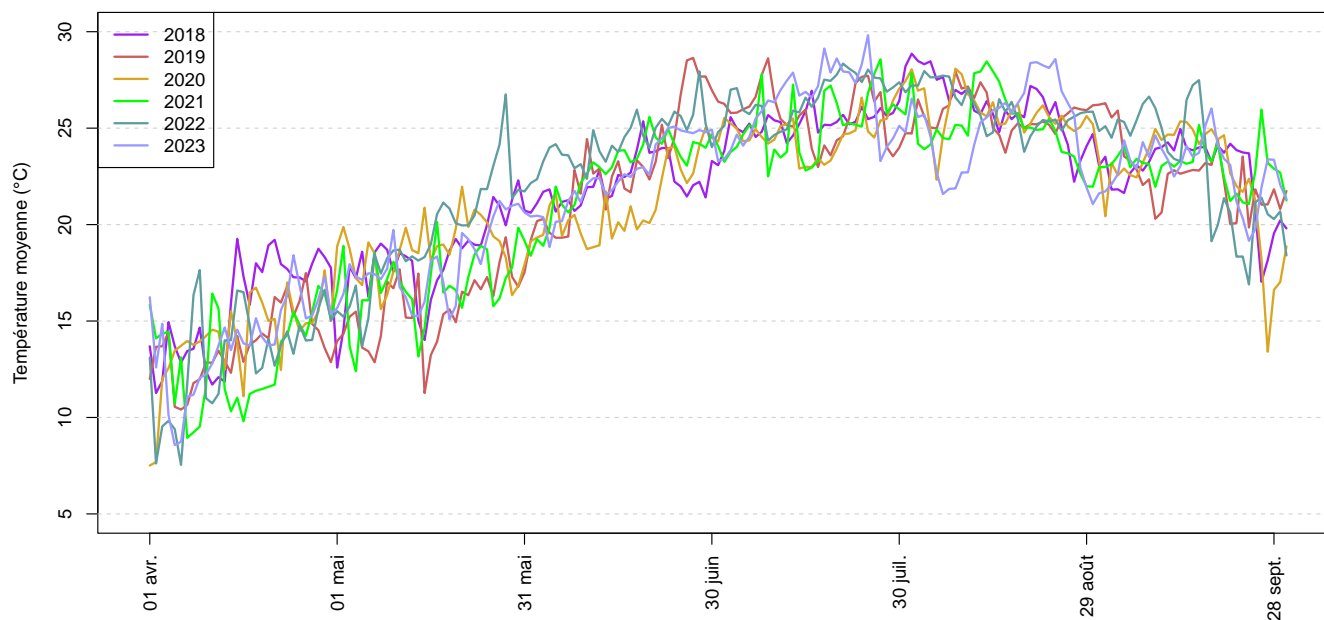


FIGURE 2 – Courbes de température moyenne par millésime.

floraison, mi-véraison et des vendanges observées sont affichées sur ces mêmes graphiques pour chaque millésime. Attention, ces flèches peuvent être inexactes puisqu’il y a des données manquantes (par exemple la mi-floraison en 2022) et le débourrement n’a pas été recensé en 2018 et 2019.

La plupart des tendances montrent une alternance d’écarts positifs et négatifs, ce qui montre tout simplement que le type de temps joue fortement sur la température, et qu’il est hautement variable. Cependant nous retrouvons les tendances suivantes :

- 2018 : un début de saison légèrement plus chaud que la normale en avril,
- 2019 : des écarts de température négatifs en mai,
- 2020 : des écarts négatifs continus de mai jusqu’à fin juillet,
- 2021 : un mois d’avril assez frais,
- 2022 : des écarts positifs et continus de mai à fin juillet,
- 2023 : une période chaude au mois de juillet suivie d’une période avec des anomalies négatives au mois d’août.

TABLE 5 – Somme des températures moyennes entre le 1er avril et le 30 septembre (en °C)

2018	2019	2020	2021	2022	2023
3976	3856	3870	3844	4044	3931

A l’échelle journalière, nous disposons de températures minimales (température la plus basse observée la nuit) et maximales (température la plus élevée observée durant le jour). Nous moyennons ces températures pour chaque capteur sur la saison (1er avril à 30 septembre) de chaque millésime. La distribution des valeurs moyennées est affichée sur les boîtes à moustaches ci-dessous.

Nous voyons qu’en effet, les millésimes les plus chauds sont 2018 et 2022 : il s’agit bien des deux millésimes où nous observons des périodes avec des écarts positifs qui durent dans le temps. Le millésime 2022 se distingue cependant de part des températures diurnes moyennes particulièrement élevées par rapport aux autres millésimes. Si nous sommes les températures depuis le 1er avril jusqu’au 30 septembre, nous obtenons des sommes de températures de 3975°C et 4043°C en 2018 et 2022 respectivement, alors que la valeur moyenne entre 2019 et 2021 est de 3855°C.

Ecarts à la température moyenne de la période 2018 – 2023 (°C)

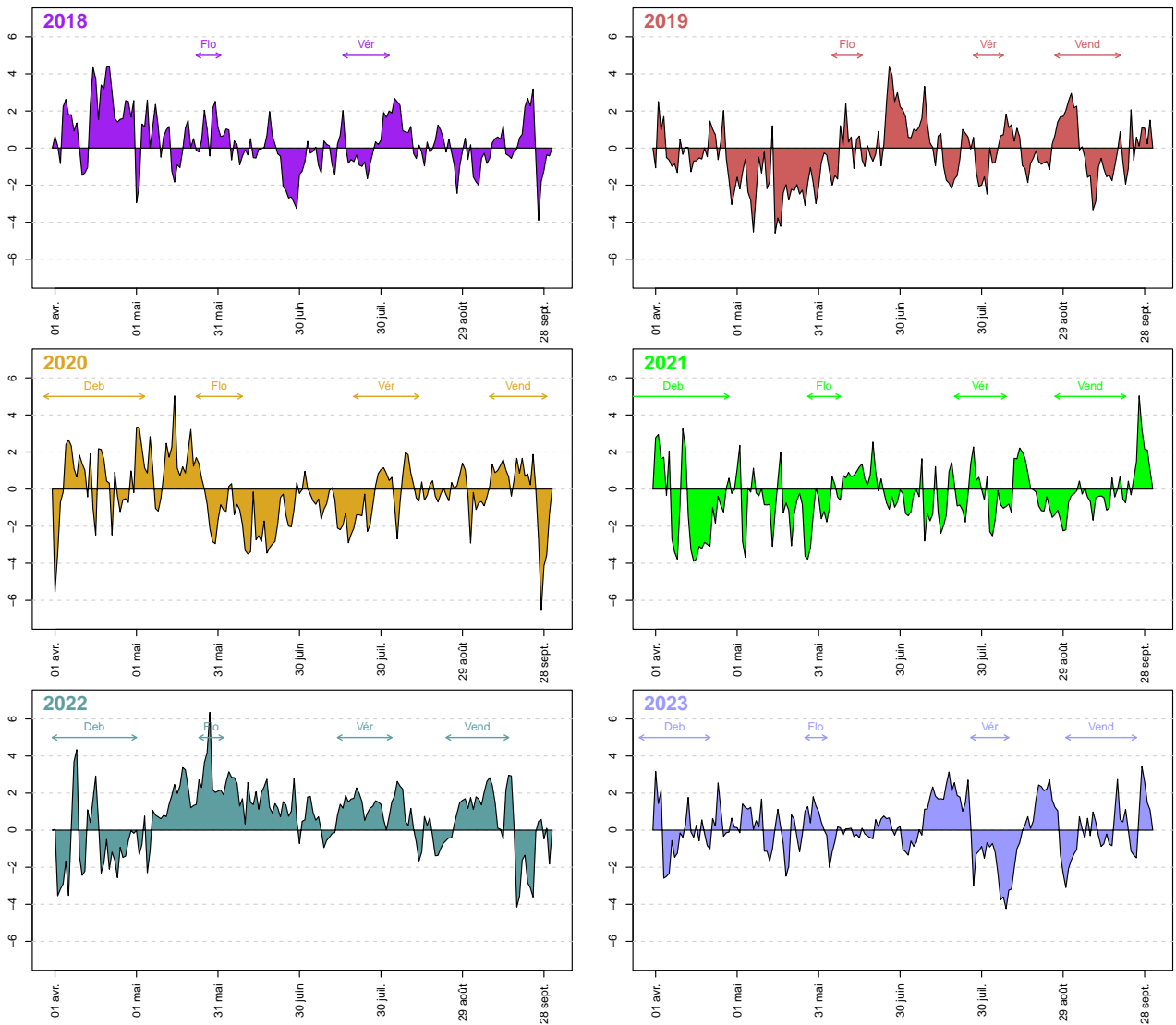


FIGURE 3 – Boîtes à moustache des moyennes des températures minimales et températures maximales journalières calculés sur le réseau de capteurs pour chaque millésime, du 1er avril au 30 septembre.

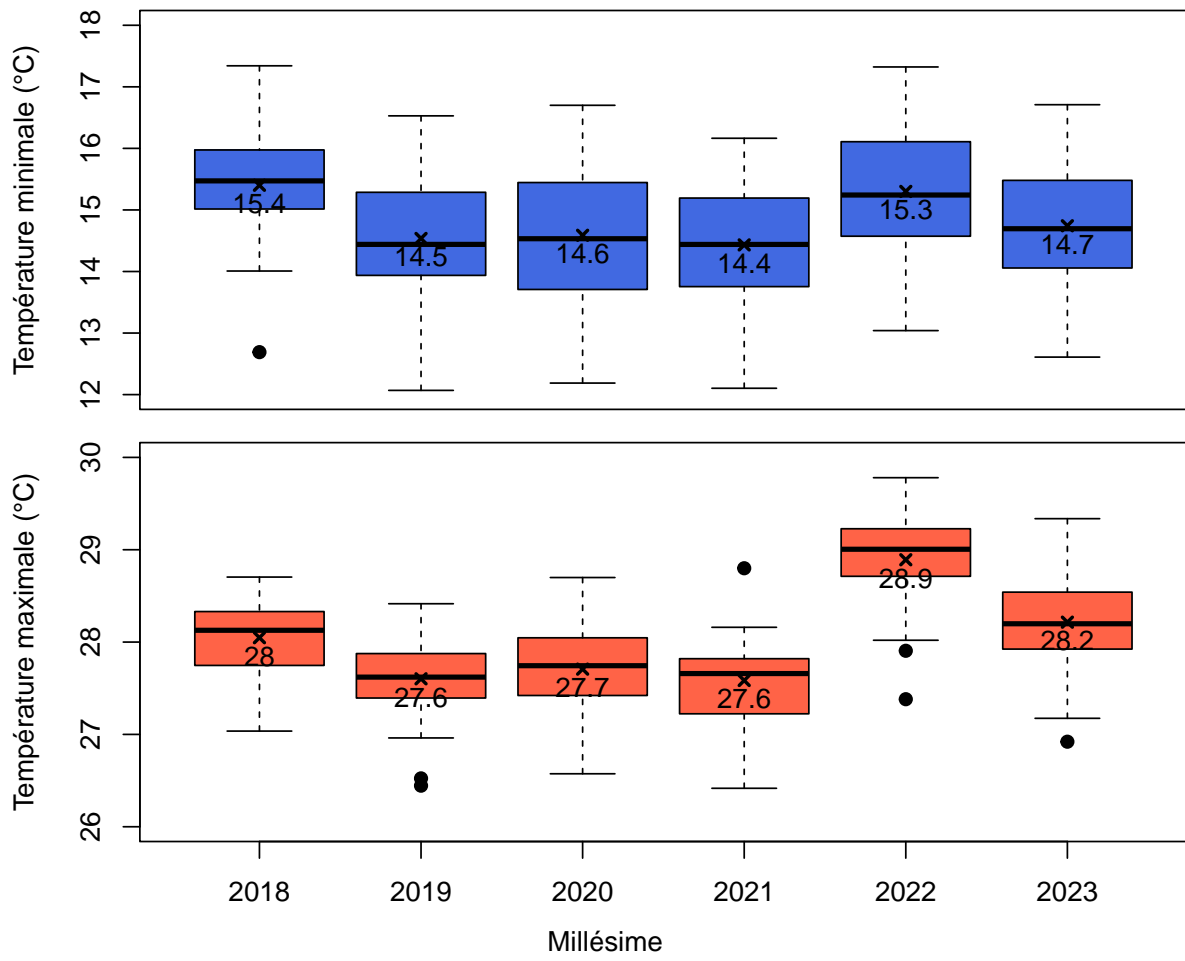


FIGURE 4 – Boîtes à moustache des moyennes des températures minimales et températures maximales journalières calculés sur le réseau de capteurs pour chaque millésime, du 1er avril au 30 septembre.

2.2.2 Variabilité inter-millésime capteur à capteur

Nous souhaitons regarder quels capteurs connaissent la plus grande variabilité entre millésimes au cours du programme. Nous montrons ci-dessous l'évolution de la température minimale moyenne par capteur, ainsi que la distribution de la variance inter-millésimes (Figure 5). Premièrement nous remarquons que le gradient entre capteurs se maintient au fil des millésimes. Cependant nous observons des variations hétérogènes entre capteurs : certains capteurs ont une température minimale moyenne variable, et d'autres sont stables. Sur l'histogramme à droite, nous avons localisé les parcelles sur la distribution des variances : la variance des températures minimales moyennes varie de 0.25 à 0.7 (sans unité). La parcelle AGH15 a les températures minimales les plus stables entre millésimes, suivie de TAL09, ALER04 et AGH19A. Les parcelles connaissant la plus grande variabilité inter-millésimes sont TAL01 et TAL04. Les extrêmes sont les mêmes d'année en année : AGH17 connaît les températures minimales les plus fraîches et AGH09 les températures minimales les plus clémentes.

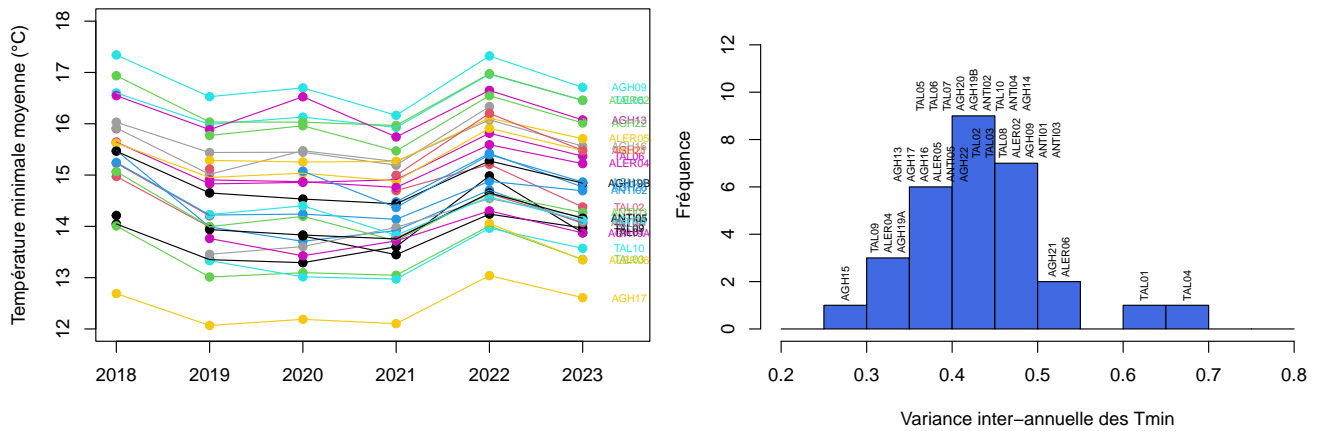
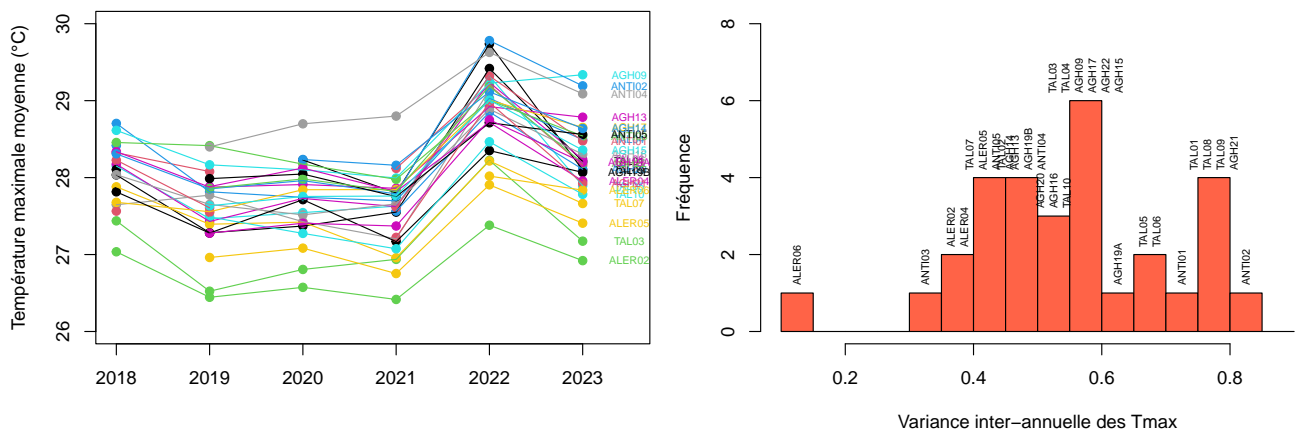


FIGURE 5 – Variance des températures minimales entre millésimes : température minimale moyenne par capteur et par millésime, et distribution de sa variance.

Cette variabilité entre millésimes est représentée sur la carte ci-dessous (Figure 6).



tmax : variances plus grandes sauf pour ALER06 variabilité due aux années de forte température *text sur graphique à revoir*

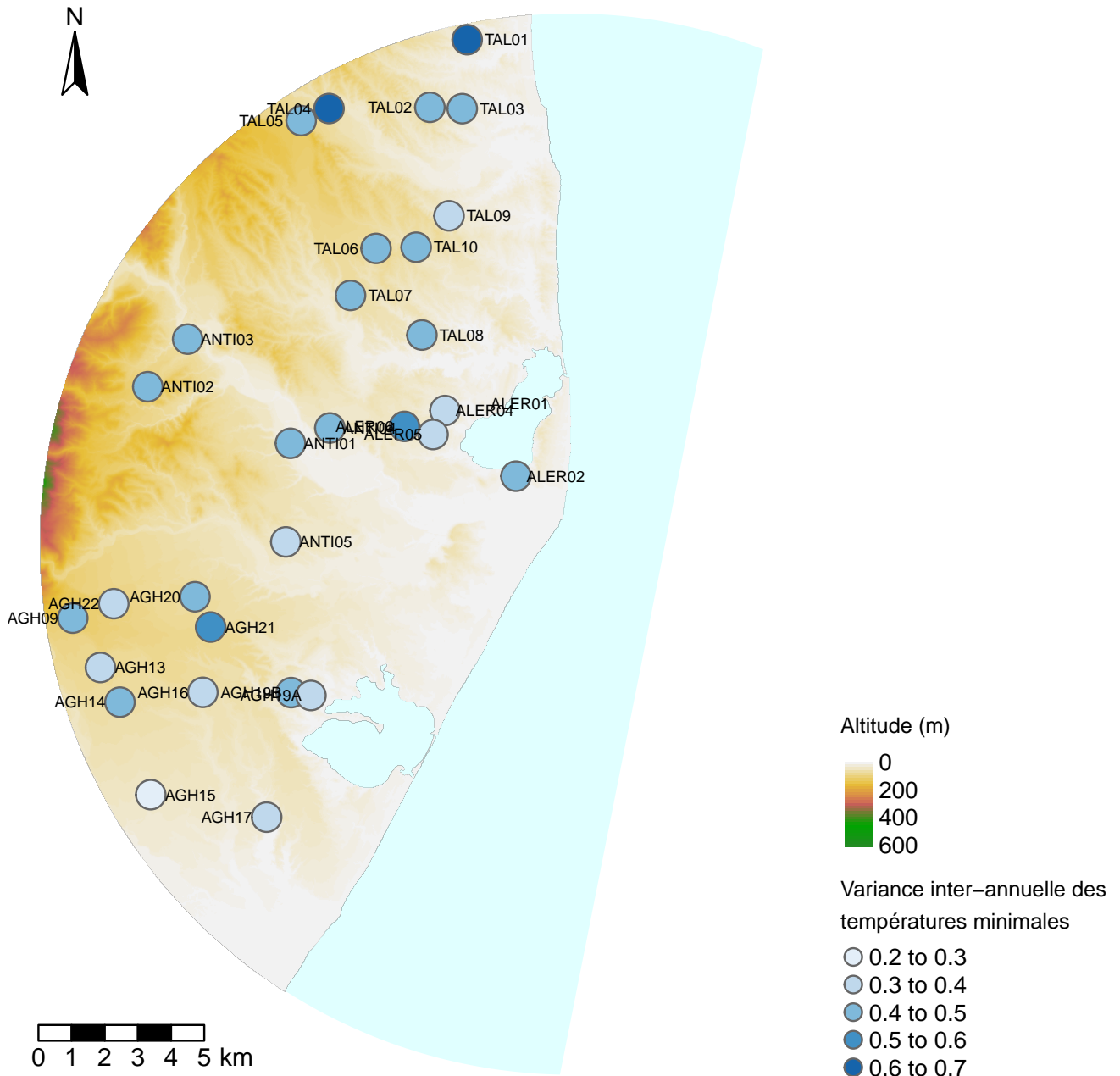


FIGURE 6 – Carte de la variance observée sur les températures minimales moyennes entre 2019 à 2023.

2.2.3 Variabilité intra-journalière

— Variabilité temporelle : amplitude thermique journalière ou **Diurnal temperature range (DTR)** :

Le **diurnal temperature range** correspond à la différence entre la température minimale et la température maximale en une journée (Figure 7). Naturellement, le DTR varie au cours de la saison et d'un jour à l'autre en fonction du type de temps. Par exemple, les journées ensoleillées seront suivies par des nuits fraîches, provoquant un DTR plus important qu'en présence de couverture nuageuse. Le DTR moyen du réseau est affiché ci-dessous sur l'année. Nous n'observons pas de grande différence entre les millésimes car les variables intra-millésimes sont plus importantes. Ces variations semblent plus importantes au printemps avec, l'occurrence de journées avec des faibles et de fortes DTR jusqu'au mois de mai. A partir de juin, le DTR est plus stable avec environ 14°C de DTR pour tous les millésimes.

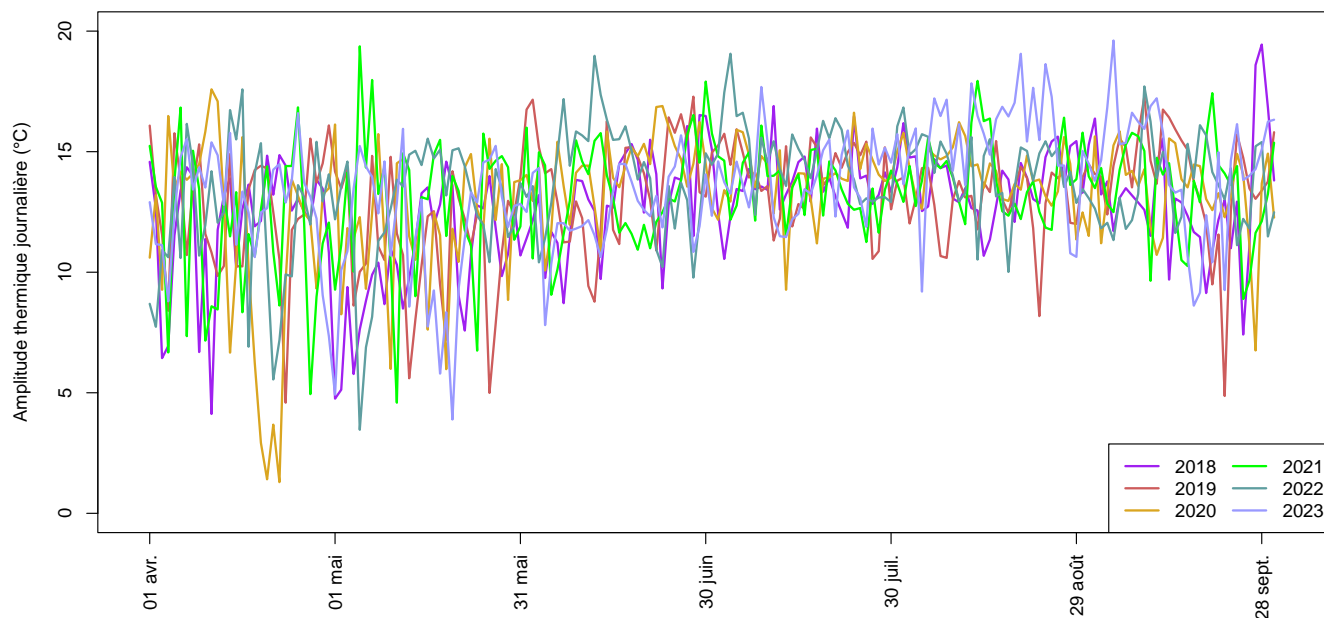


FIGURE 7 – Courbes de l'amplitude thermique diurne (DTR) entre le 1er avril et le 30 septembre, moyenné par millésime.

Nous moyennons ces valeurs entre le 1er avril et le 30 septembre pour obtenir un DTR moyen sur la saison de végétation (Figure 8). Nous remarquons que le DTR moyen semble augmenter au fil des millésimes, avec des DTR particulièrement élevés en 2022 et 2023.

A titre d'exemple, nous montrons le DTR observé en 2022 sur les capteurs de température des 6 parcelles microvinifiées (Figure 9). Les 6 courbes suivent les mêmes dynamiques, dépendant du type de temps. A l'échelle de chaque jour, nous voyons un gradient très clair entre les parcelles, qui se maintient tout au long de la saison : le DTR est faible pour la parcelle AGH09, et élevé pour la parcelle AGH17. Les écarts de température entre nuit et jour diffèrent de 4.9°C en moyenne entre ces deux parcelles, ce qui peut représenter une différence d'énergie thermique conséquente à l'échelle de l'année. Nous remarquons que l'écart est le plus important en mai, et se resserre pendant la période de maturation (fin août, début septembre). Les DTR moyens des parcelles microvinifiées sont affichés dans la table ci-dessous.

Le DTR a été modélisé à l'échelle de la zone d'étude (sauf pour 2018) pour situer les zones à forte amplitude thermique journalière (Figure 10). Cette représentation cartographique confirme le constat que les millésimes 2022 et 2023 ont présenté des écarts plus importants entre t_{max} et t_{min} que les autres millésimes. L'écart de température journalière paraît plus conséquent dans les vallons et aux extrémités nord et sud de la plaine. Les écarts de température journalière sont bien moindres en altitude.

La relation entre amplitude thermique et intensité du vent est souvent citée dans la littérature. Pour tenter d'expliquer ces variations entre parcelles, nous allons comparer le profil annuelle du DTR et de la vitesse du vent

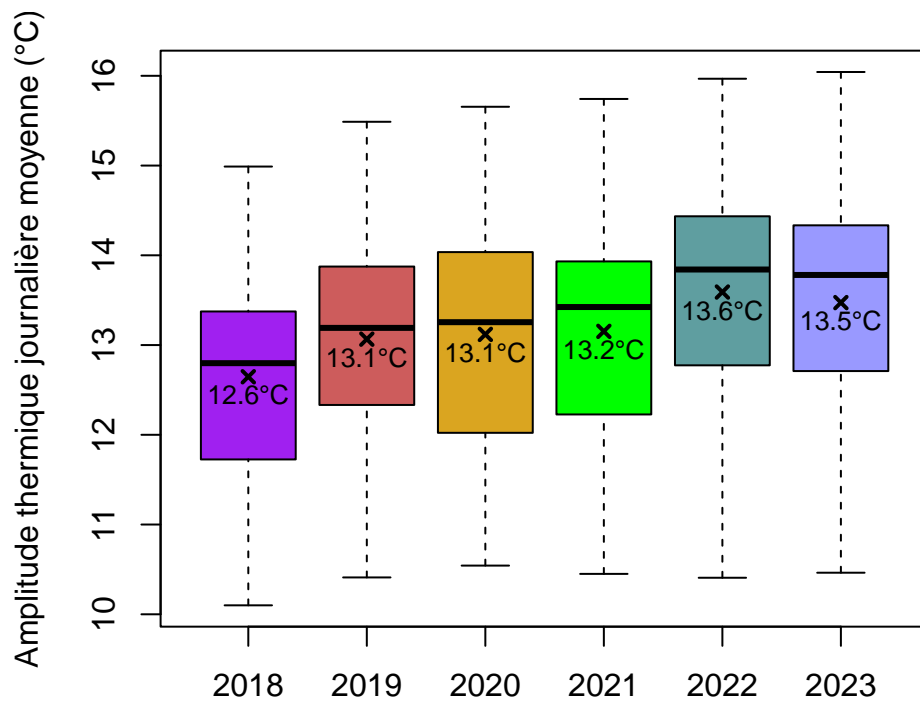


FIGURE 8 – Boîtes à moustaches des amplitudes de températures journalières moyennes entre 2018 et 2023.

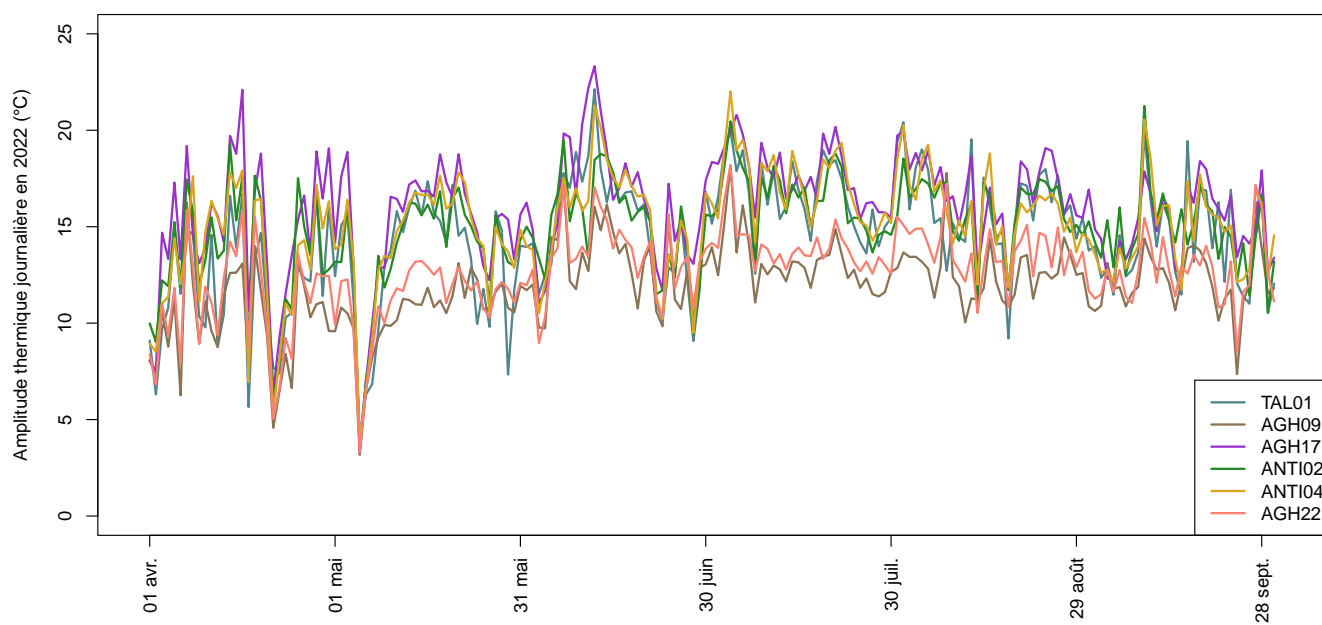


FIGURE 9 – Courbes représentant l'amplitude thermique journalière sur les parcelles microvinifiées en 2022.

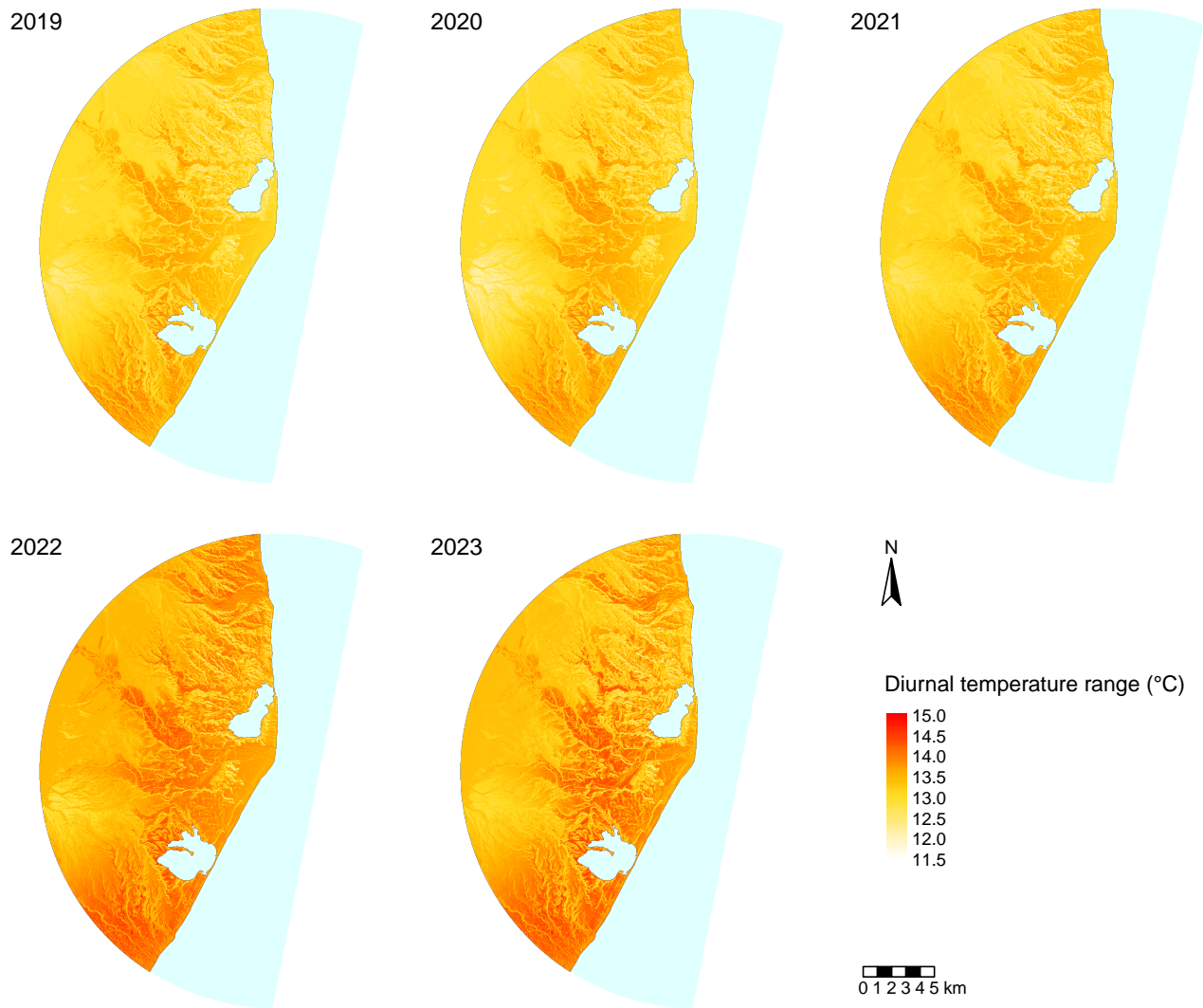


FIGURE 10 – Carte des DTR (diurnal temperature range) moyennées entre le 1er avril et le 30 septembre de 2019 à 2023, modélisées par SVM.

TABLE 6 – DTR moyens observées sur les parcelles microvinifiées en 2022

Amplitude journalière moyenne (°C)	
TAL01	14.5
AGH09	11.9
AGH17	16.0
ANTI02	14.9
ANTI04	15.0
AGH22	12.5

enregistré par les 7 stations météo en 2022 (Figure 11). Nous remarquons à nouveau un gradient qui se maintient entre parcelles, comme pour les parcelles micovinifiées. Les deux parcelles AGH09 et AGH17 sont présentes ici, avec des profils venteux très différents : la parcelle AGH09 connaît une vitesse moyenne du vent à l'échelle de l'année de 4.8 km/h alors que la parcelle AGH17 subit seulement 0.9 km/h de vent en moyenne. La **corrélation entre ces deux variables est égale à -0.42** en 2022. Ces différences de profil venteux semblent causer les écarts de DTR mais peuvent aussi avoir des effets directs sur le végétal, comme l'assèchement des feuilles et des grappes. Nous allons étudier l'impact du DTR sur la maturation des raisins.



FIGURE 11 – Courbes de l'amplitude thermique journalière (DTR) et vitesse du vent enregistrés sur les 7 parcelles équipées de station météo en 2022.

2.3 Variabilité spatiale des températures

Nous étudions l'amplitude des températures observées sur le réseau, c'est-à-dire les différences de température entre le capteur le plus chaud et le capteur le plus froid, pour les températures nocturnes et diurnes tout au long de l'année (Figure 12). Ces différences varient au fil des jours, puisque certains jours les températures sont homogènes (1°C d'écart sur le réseau) et dans les cas extrêmes, les capteurs ont enregistré jusqu'à 12°C d'écart en température de nuit entre capteurs (en 2018) et 8°C d'écart en température de jour (en 2021). Les écarts de température nocturnes

sont variables mais plutôt constantes d'un millésime à l'autre. Les écarts entre températures de jour sont plus importantes en 2022 et 2021 que les 3 autres millésimes. Cela signifie que les écarts en terme de rayonnement reçu semblent se renforcer à l'échelle de la plaine orientale.

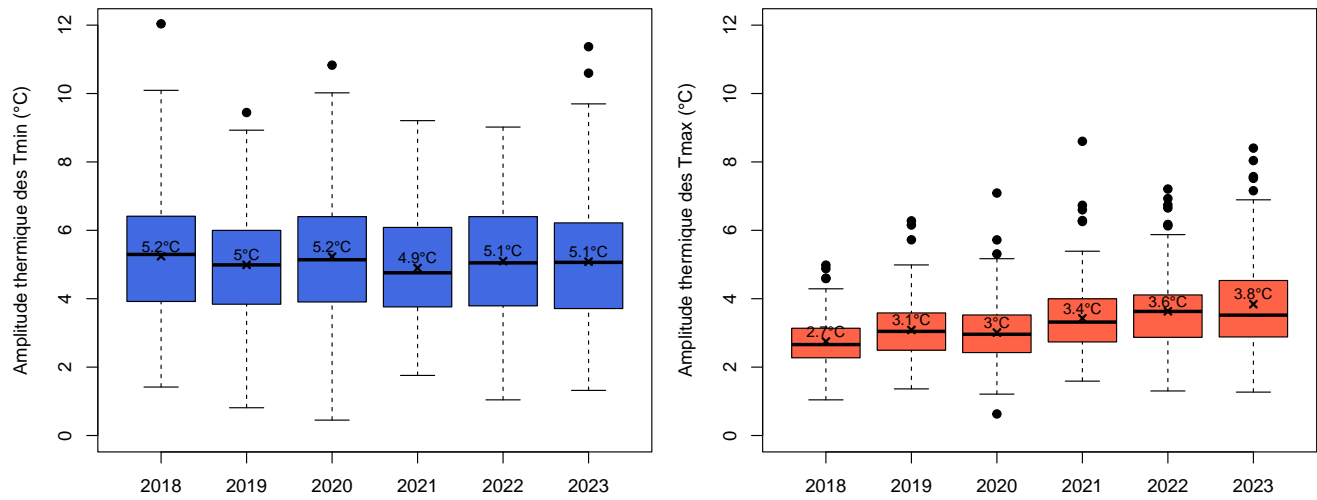


FIGURE 12 – Boîtes à moustaches des amplitudes de températures minimales et maximales observées sur le réseau entre 2018 et 2023.

2.3.1 Modélisation des indices de température

A partir de 2019, le réseau de capteurs était assez dense pour faire un zonage thermique, c'est-à-dire calculer les températures à l'échelle de la zone d'étude (avec une résolution de 25m² équivalent à la résolution du modèle numérique de terrain). Un fichier raster a été généré par jour pour les températures minimales et maximales. Des indices de température sont calculés à partir de ces modélisations. Nous comparons ces indices de température par millésime, en utilisant une légende identique afin de visualiser la variation inter-annuelle.

Dans le cadre de cette étude bilan, les modélisations des indices de température ont été refaites pour chaque millésime sur la période du 1er avril au 30 septembre.

Nous voyons sur les cartes de températures minimales modélisées (Figure 13) que la zone la plus chaude du réseau pour l'ensemble des millésimes concernés se situe nord-ouest de Ghisonaccia, et concerne les parcelles de Aghione. Les températures minimales modélisées sont les plus basses à l'échelle du réseau en 2020 et les plus élevées en 2022. Les vallons semblent maintenir leur fraîcheur qu'importe le millésime.

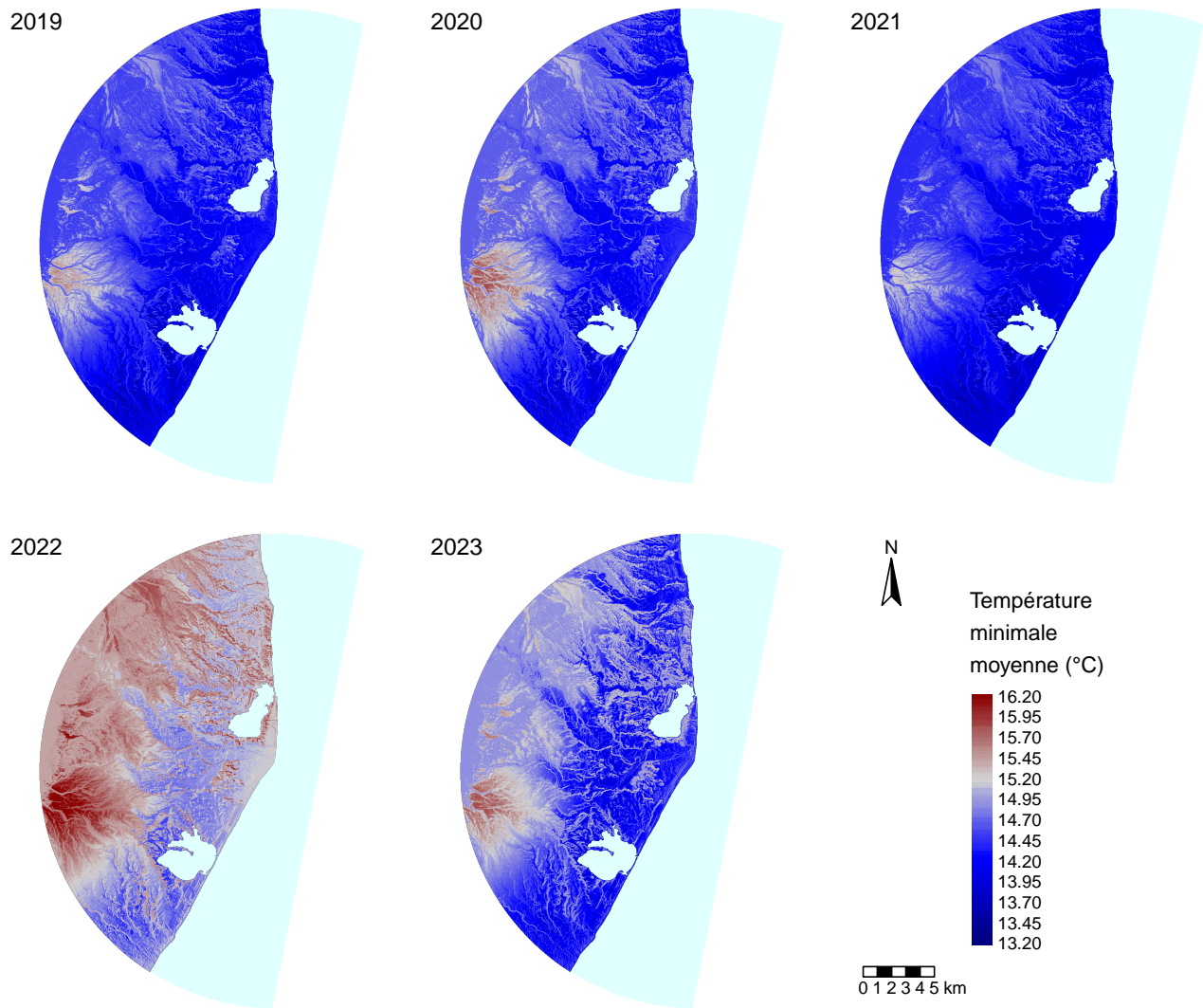
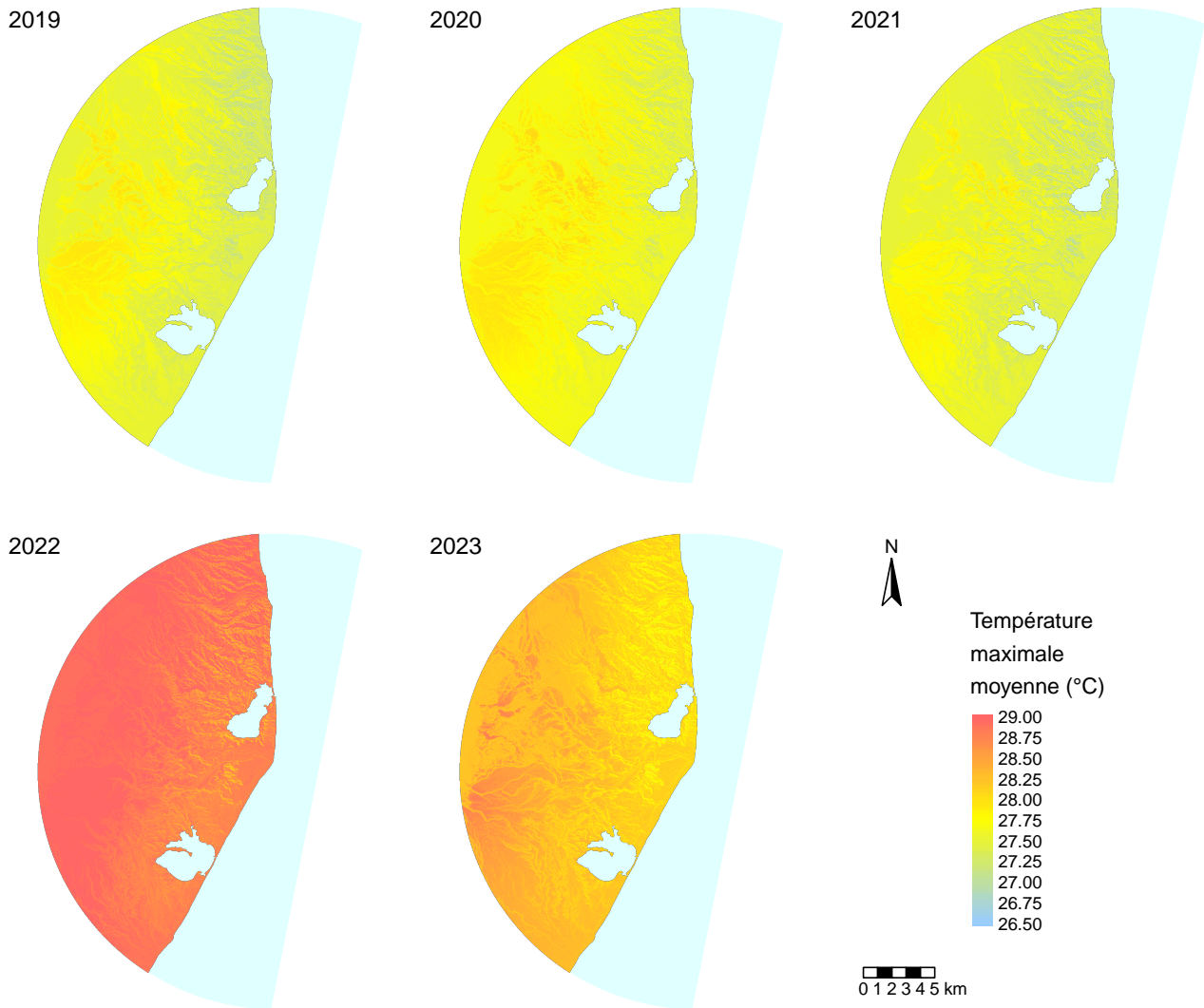
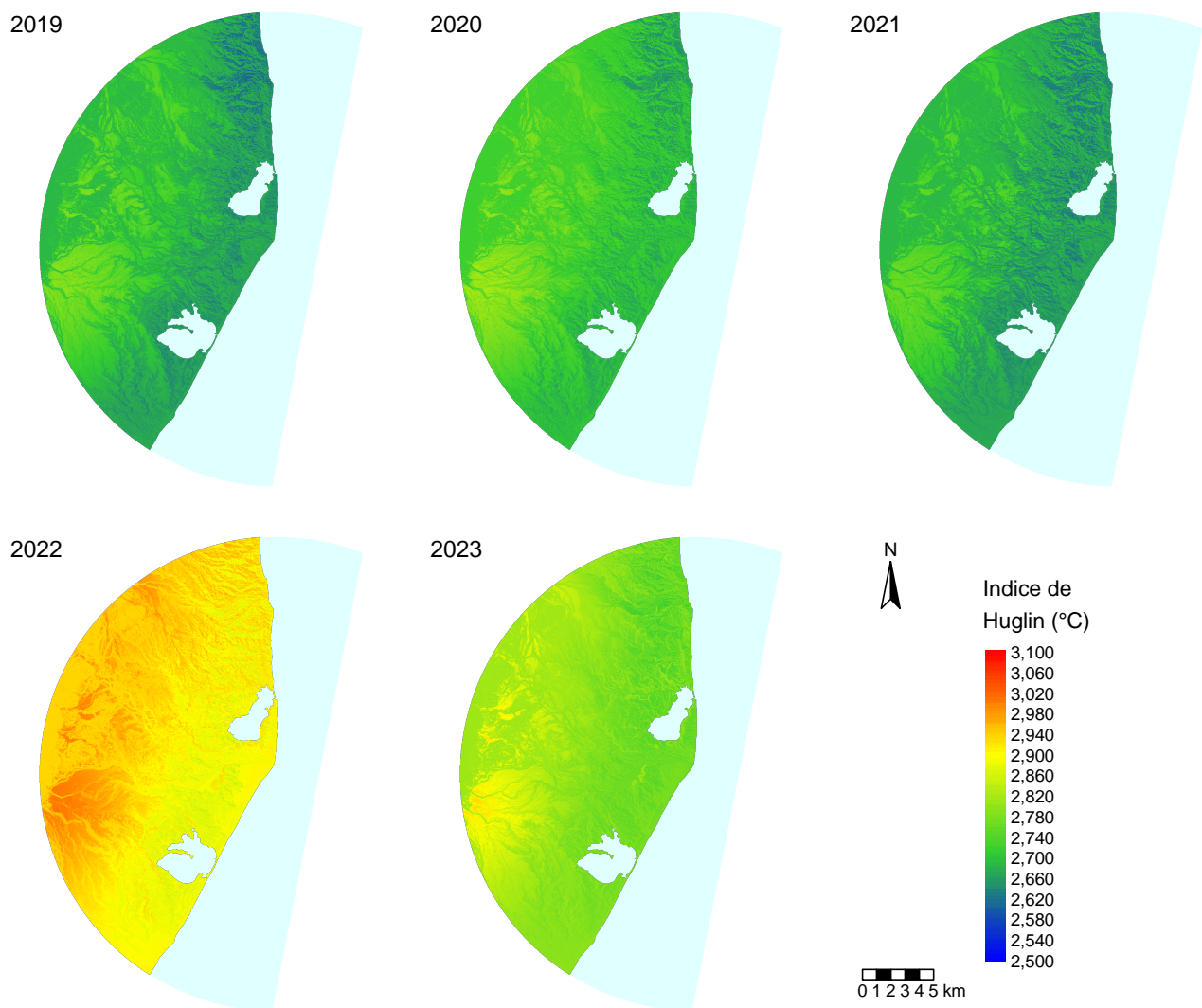


FIGURE 13 – Carte des températures minimales moyennes entre le 1er avril et le 30 septembre de 2019 à 2023, modélisées par SVM.



Nous faisons le même constat sur les températures maximales (Figure ??) avec une année 2020 ayant des températures maximales faibles et 2022 des températures particulièrement élevées. Cette augmentation semble se produire de manière continue sur toute la zone d'étude puisqu'aucune température maximale modélisée ne se situe en-dessous de 28°C en 2022. On peut donc s'interroger sur la manière dont la topographie impacte les températures maximales d'année en année.



L'indice hélio-thermique d'Huglin témoigne du rayonnement reçu par le végétal pendant la saison. Les cartes modélisées de l'indice de Huglin (Figure ??) servent avant tout à démontrer que l'indice de Huglin est plus variable entre millésimes qu'au sein du réseau : l'indice est homogène à 200°C près sur la zone chaque année, mais fluctue de manière très importante entre 2019 et 2022.

La dernière série de cartes montre le nombre de jours pour lesquels la modélisation des températures maximales passe au-delà de 35°C (Figure 14). Avant 2022, ce nombre ne dépasse pas 11 jours sur l'année à l'ouest du réseau. En 2022, la valeur maximale est de 23 jours et nous la retrouvons dans plusieurs régions de la zone : autour de Aghione, au nord autour de San-Giuliano et autour de Tallone. La modélisation indique qu'aucune zone n'échappe à ces pics de température en 2022, puisque le plus petit nombre de jours modélisé est de 4 jours. Le millésime 2023 a été globalement plus frais que 2022 mais nous voyons malgré tout un nombre de jours au-dessus de 23 jours assez important, et réparti de manière différente qu'en 2022 : le nord du réseau est relativement épargné mais l'ouest connaît des températures extrêmes plus fréquentes.

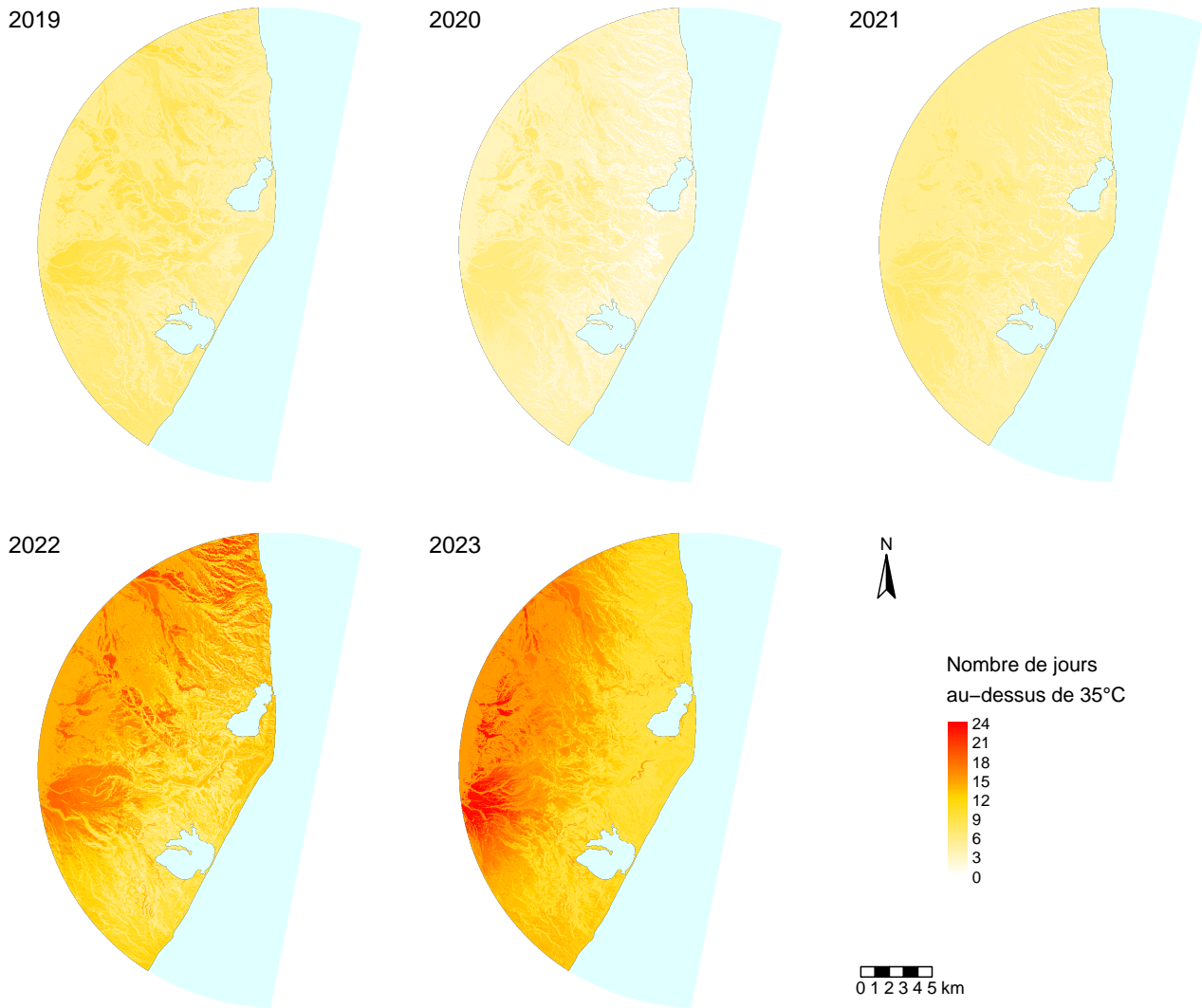


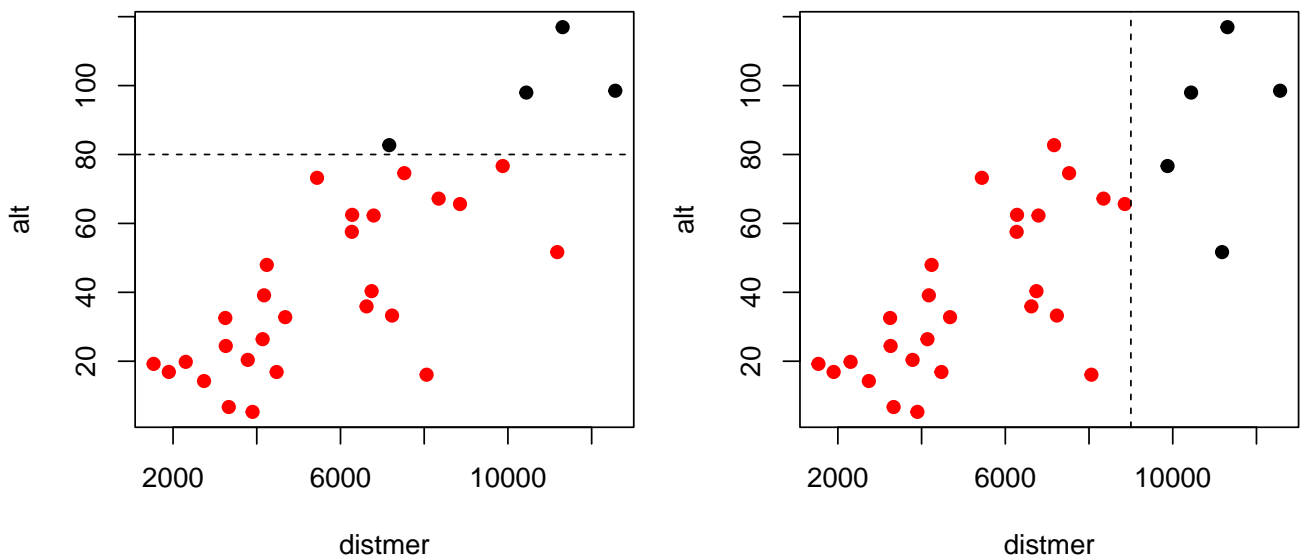
FIGURE 14 – Carte du nombre de jours sur la saison au-dessus de 35°C de 2019 à 2023, modélisées par SVM.

2.4 Impact de la topographie sur la structuration des températures

Pour généraliser ces observations, nous allons étudier l'impact des variables topographiques sur les indices thermiques suivants : température minimale, température maximale et DTR. Ces indices seront considérés sur différentes périodes. Remarque : le travail de modélisation pour un but d'inférence n'est fait que sur les données des capteurs, c'est-à-dire les données réellement observées.

Avant cela, nous allons sélectionner les variables à étudier pour chaque indicateur. Sur ce réseau, nous savons suite aux analyses pluri-annuelles qu'il existe des colinéarités entre l'*altitude*, la *longitude* (x) et la *distance à la mer* : en effet, du fait du relief à gauche du réseau, ce sont les mêmes parcelles qui sont loin de la mer, en altitude et le plus à l'ouest. Nous écartons d'office la variable *longitude* pour nous concentrer sur les deux caractéristiques *distance à la mer* et *altitude*.

2.4.1 Etude des colinéarités entre distance à la mer et altitude (sur les données prises sur la saison) :



Nous enlevons les points les plus extrêmes en altitude (au dessus de 80m) et en distance à la mer (au dessus de 9km), afin de regarder l'effet du gradient de chaque variable en l'absence de ces points extrêmes. Sur ce jeu de données réduit, nous étudions les indices moyennés sur la saison avec le modèle suivant :

$$Y_{saison} \sim altitude + distancemer + (1|parcelle) + (1|millésime)$$

où *altitude* et *distance à la mer* sont considérés comme des effets fixes, et les effets de la *parcelle* et du *millésime* sont considérés comme des effets aléatoires, c'est-à-dire sources de variabilité mais pas d'intérêt pour l'inférence. La variance expliquée par les deux effets fixes de manière séparée et combinée est étudiée pour chacune des 3 indices.

Pour synthétiser ce travail, nous observons que pour la température minimale et l'amplitude journalière moyennées sur la saison, les effets *altitude* et *altitude + distance à la mer* expliquent une part de variance équivalente : même en l'absence de points extrêmes en altitude, ce facteur engendre un gradient sur le réseau. Nous retenons l'effet *altitude* pour ces deux indices. Pour la température maximale on fait le constat que l'altitude joue peu, alors que la distance à la mer explique une quantité de variance importante. On garde à l'esprit tout de même qu'il existe une colinéarité intrinsèque sur ce réseau.

2.4.2 Méthodologie et protocole de modélisation

Ce protocole sera repris lors de la modélisation des paramètres de la maturation.

Douze variables-réponse Y sont analysées par modèle linéaire aléatoire mixte : trois indices de température qui sont *température minimale*, *maximale* et *amplitude de température* moyennées sur les quatre périodes suivantes :

- la saison c'est-à-dire du 1er avril au 30 septembre
- avant floraison c'est-à-dire du 1er avril au 31 mai
- entre floraison et véraison c'est-à-dire du 1er juin au 31 juillet
- pendant la période de maturation c'est-à-dire du 1er août au 15 septembre

Le modèle suivant est appliqué pour chaque Y :

$$Y \sim altitudeOUdistancemer+expoSN+expoEO+latitude+pente+millésime*(altitudeOUdistancemer+expoSN+expoEO+latitude+pente)$$

Ce modèle étudie l'effet des 5 facteurs de topographie sur les indices de température, en testant si ces effets sont dépendant du millésime. En effet, nous testons la significativité de l'interaction entre la topographie et le millésime. Ce modèle est réduit progressivement en enlevant les facteurs les moins significatifs (attention, les contrastes sont contraintes à 0 avec *contr.sum* sur millésime). Un facteur simple ne peut pas être extrait du modèle si son interaction est significative. Les variabilités intrinsèques au millésime et à la parcelle sont prises en compte en tant qu'effets aléatoires, et la variance associée est communiquée dans le tableau de résultats (ramenées à l'unité en divisant par la variance de Y).

La table ci-dessous récapitule les résultats des modèles finaux. Ce qui nous intéresse en premier lieu est la variance expliquée par les facteurs et le sens des relations établies. La **variance expliquée** par les effets fixes et leurs interactions est calculée par les fonctions du package **PartR2**. Cette variance expliquée (*partR²*) comprend la variance expliquée par le facteur ET la covariance partagée avec d'autres facteurs : c'est pour cela que les sommes de variance expliquée peuvent être supérieures à 100% dans le tableau de résultats.

2.4.3 Bilan de la modélisation en fonction de la topographie, par indice et par période

Les douze modélisations effectuées ne sont pas détaillées dans ce rapport, mais sont synthétisées dans la table ci-dessous. Cette table donne les pourcentages de variance expliquée (en relation à la variance de la variable réponse Y) pour chaque facteur de topographie. Les étoiles indiquent une interaction significative avec *millésime*, ce qui signifie que l'importance de cet effet varie en fonction du millésime. Les symboles + et - indique le sens des relations en cas de relation significative : le facteur fait augmenter ou diminuer la variable réponse Y .

TABLE 7 – Résultats de la modélisation des indices de température en fonction des facteurs de topographie : part de variance expliquée par l'altitude, la distance à la mer, les expositions, la latitude, le millésime et la parcelle. La notation ns signifie que le facteur n'impacte pas significativement la variable réponse (probabilité limite de 5%).

	Tmin				Tmax				DTR			
	Saison	Pré Flo	Flo à Ver	Post Ver	Saison	Pré Flo	Flo à Ver	Post Ver	Saison	Pré Flo	Flo à Ver	Post Ver
Modèle complet												
Moyenne de Y	14.8	9.9	17.3	17.9	28	21.9	31	32	13.2	11.9	13.8	14.1
R ² (%)	33.4	21.2	23.5	27.1	20.6	6	12.8	29.1	26.7	30.3	13	16.4
Effets fixes (part R² en %)												
altitude	29.5* (+)	17.5* (+)	20.7* (+)	25.3* (+)	non testé	non testé	non testé	non testé	16* (-)	23.6* (-)		7.6 (-)
distmer	non testé	non testé	non testé	non testé	18.2 (+)	3.3 (+)	10.7 (+)	27.3 (+)	non testé	non testé	non testé	non testé
pente	7.2 (+)	4.1 (+)	5.4 (+)	5.3 (+)					16 (-)	12.1 (-)	11.9 (-)	11.9 (-)
expo sud/nord					4.7 (-)	1.4 (-)	3.2 (-)	5.9 (-)				
expo est/ouest												
latitude	0.4* (-)	1.2* (-)	0.3* (-)			1.1* (-)	2.3* (+)	3.9 (+)			1* (+)	
Effets aléatoires (%)												
part restante parcelle	54.8	30.3	42.9	45.6	20.4	10.9	11	23.7	64.7	54.9	72.2	54.7
part restante millésime	13.1	57.1	40.8	25.2	53.4	96.7	79.5	29	4.9	11.9	12.4	20
part résiduelle	2.5	2.4	2.9	3.2	11.6	4.8	7.8	22.6	4.5	4.7	6.9	9.6

Notes :

* effet significativement différent entre millésimes

La première remarque que nous pouvons faire sur ces modèles concerne le R² du modèle complet, c'est-à-dire la variance expliquée par tous les facteurs de topographie conjointement. Nous voyons que certains modèles ne sont pas informatifs :

- la modélisation de la température minimale est moins intéressante avant floraison car elle n'explique que 21.2% de la variance,

- la modélisation de la température maximale avant floraison et entre floraison et véraison n'explique que 6.6% et 12.8% de la variance
- la modélisation du DTR n'est pas très informatif en fin de saison : 13.0% entre floraison et véraison et 16.4% pendant la maturation

Pour les températures minimales : l'altitude a un effet positif sur les températures minimales tout au long de la saison, et la force de cette relation est significativement liée au millésime. En effet, en moyenne le gain de 10m en altitude provoque $+0.22^{\circ}\text{C}$ de plus sur la moyenne de la saison. En réalité cet effet est assez homogène entre millésimes car les variations sont faibles : la relation la plus forte est en 2020 ($+0.24^{\circ}\text{C}/+10\text{m}$) et la plus faible en 2021 ($+0.2^{\circ}\text{C}/+10\text{m}$). Cet effet est légèrement renforcé pendant la période de maturation, on passe à 0.24°C par $+10\text{m}$ supplémentaire. L'effet de la pente ne dépend pas du millésime et explique environ 7.2% de la variance des températures minimales : chaque degré de pente supplémentaire augmente les températures minimales de 0.19°C . Nous remarquons qu'en début de saison, les parcelles les plus au nord du réseau (latitude plus importante) connaissent des températures minimales plus basses, mais la variance expliquée est faible et l'effet est surtout présent en 2020 (-0.06°C par unité de Y). Cet effet disparaît pendant de la période de maturation. Ensuite si nous regardons les parts de variance résiduelle, nous remarquons que sur la saison, l'effet parcelle est très important, expliquant environ 54.8% de la variance des températures minimales ; d'autre part, l'effet millésime en explique 13.1%. Ainsi il y a des facteurs de variabilité non pris en compte par ce modèle mais redondant à l'échelle parcellaire, comme la présence de facteurs environnant pouvant affecter les températures minimales. Nous remarquons aussi que la variance associée à la parcelle augmente au cours de la saison et la variance associée au millésime diminue. Pour résumer : en début de saison, les variations de température minimales entre millésimes sont très importantes mais en fin de saison, il y a peu de variance inter-millésime (25.2%) mais il y a une part importante de variation inter-parcelles (45.6%) non expliquée par les facteurs de topographie. Les anomalies de température minimale, redondantes entre années, sont calculées par parcelle et sont affichées sur la Figure 15.

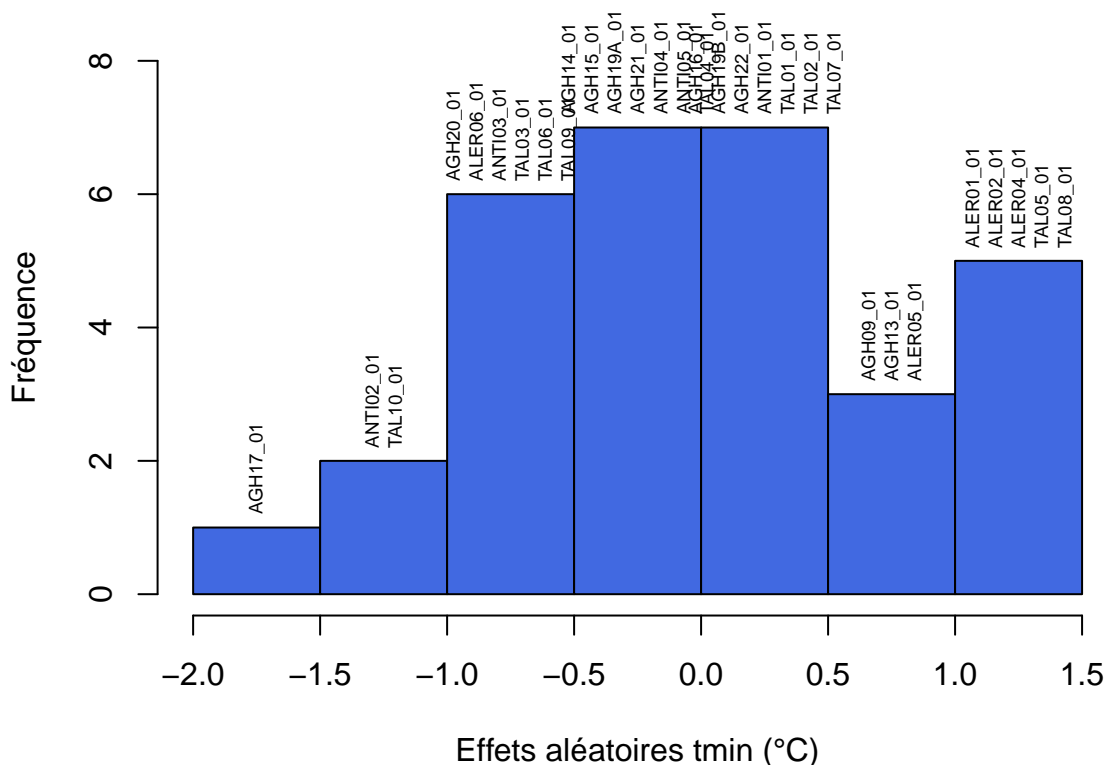


FIGURE 15 – Histogramme des effets aléatoires parcelle dans le modèle expliquant les températures minimales sur la saison : anomalies de température par parcelle.

Pour les températures maximales : le modèle le plus intéressant à exploiter est celui de la température maximale moyennée sur la période de maturation car la variance expliquée par les effets fixes est de 29.1% (ce qui reste assez faible). Dans ce modèle il n'y a pas d'interactions significatives avec le millésime : les effets de la topographie sont stables d'un millésime à l'autre. La distance à la mer est le facteur principal avec 27.3% de variance expliquée

parmi les 29.1% totaux : un kilomètre supplémentaire augmente les températures maximales de 0.16°C durant la maturation. En regardant les 2 autres sous-modèles nous pouvons noter que cet effet augmente au cours de l'année. L'exposition sud/nord joue aussi significativement avec 5.9% de variance expliquée : les parcelles orientées vers le sud profitent de températures diurnes plus élevées, et ceci surtout pendant la maturation. La latitude joue aussi significativement avec des parcelles situées au nord ayant des températures maximales plus élevées en fin de saison. L'effet propre à l'environnement de la parcelle (en dehors de la topographie) semble le plus important durant la maturation avec 23.7% de variance expliquée (effet parcelle). La variance inter-millésime est très importante, et notamment en début de saison (96.7%) : en effet, nous avons vu que les températures maximales sont hautement variables d'un millésime à l'autre.

Pour l'amplitude de température journalier DTR : la topographie semble plus expliquer le DTR en début de saison ($R^2 = 30.3\%$) qu'en fin de saison ($R^2 = 16.4\%$). En début de saison, plus la parcelle est en altitude, moins il y a d'écart journaliers (-0.167°C/+10m) : cet effet est dépendant de l'année et nous remarquons que l'altitude joue notamment en 2020 où on passe à -0.214°C d'écart/+10m. L'effet de la pente est constante entre années et dans la saison avec -0.28 par degré de pente. La variance non expliquée due à la parcelle est importante (64.7%) et cela rejoint l'importance du facteur vent sur l'amplitude thermique vue précédemment. La variation inter-millésime est relativement faible (4.5% sur la moyenne de la saison).

2.5 Bilan de l'objectif 1 : caractérisation de la variabilité climatique

Dans ce programme Terroir, nous avons étudiée le micro-climat de la plaine orientale par le biais de capteurs de température placés auprès de la vigne, et plus récemment de stations météo sur certaines parcelles. Le positionnement de ces capteurs a été efficace pour étudier l'impact des facteurs de topographie sur les températures : nous avons été en mesure de calculer les variations de température en fonction de l'altitude, de la distance à la mer, de la pente, de l'exposition et des coordonnées (latitude, longitude).

A l'échelle d'un millésime donnée, les températures minimales sont hautement variables, à la fois entre parcelles et entre jours de l'année. Les parcelles situées en altitude et en pente sont épargnées par les températures nocturnes les plus basses. L'effet "protecteur" de l'altitude est plus ou moins fort en fonction du millésime, puisque nous voyons que lors des deux derniers millésimes, l'impact de l'altitude supplémentaire est moindre. La température étant générée au cours de la journée grâce au rayonnement, c'est en étudiant l'amplitude thermique journalière que nous remarquons l'importance du vent dans la régulation des températures minimales. En effet, en l'absence de vent, le brassage de l'air est réduit (stagnation d'air froid) et les températures minimales peuvent baisser davantage, avec des écarts allant jusqu'à 20°C entre jour et nuit. La présence de vent est en partie conditionnée par la topographie de la parcelle, mais pas que : des facteurs locaux comme la présence de forêts ou de bâtiments vont aussi jouer un rôle de protection contre le vent. Ces basses températures peuvent freiner le développement végétatif de la vigne, en retardant la phénologie et allongeant la période de maturation. Il est nécessaire de déterminer dans quels contextes la présence de températures basses est un frein ou une opportunité pour la production du Vermentinu.

Les températures maximales connaissent une variabilité moindre entre parcelles et entre jours de l'année, mais elles connaissent une plus grande variabilité inter-millésime. En effet, trois millésimes se dégagent : 2018, 2022 et 2023 ont connu des périodes plus chaudes au début de l'été que les 3 autres millésimes. Le nombre de jours avec des températures extrêmes est particulièrement élevé durant les deux derniers millésimes. Ces deux années ne sont pas suffisantes pour inférer l'impact du dérèglement climatique mais peuvent nous témoigner de conditions de productions futures. Nous avons vu que la topographie joue un effet constant sur les températures maximales et ceci notamment pendant la période de maturation. Des températures trop élevées peuvent compromettre la typicité des vins produits.

3 Objectif 2 : Améliorer la connaissance du cépage Vermentinu dans les différentes situations de terroir

3.1 Description du comportement du Vermentinu entre millésimes

3.1.1 Stades phénologiques

— Date de mi-débourrement :

La date de mi-débourrement marque la reprise de l'activité biologique de la vigne après la dormance hivernale. Après la levée de la dormance, le débournement de la vigne est un point de départ pour la croissance du végétal, et pourra potentiellement déterminer les périodes de croissance ultérieures. Certains auteurs appuient l'importance des températures hivernales dans la levée de la dormance, et notamment l'occurrence de températures froides. D'autres auteurs précisent que seules les sommes de température durant l'hiver ont une importance sur la date de mi-débournement. En 2022, la date de mi-débournement était en effet impactée par la moyenne des températures observées entre le 1er janvier et le 31 mars 2022 (voir rapport 2022). Il serait intéressant de se rapprocher des chercheurs modélisateurs de l'équipe AgroClim de INRAE Avignon afin de calibrer les modèles les levée de dormance sur les données du programme Terroir.

Le période de mi-débourrement est variable sur le réseau : nous observons seulement 26 jours d'écart entre la placette la plus précoce et la plus tardive en 2023, contre 41 jours en 2021. L'année démontrant le débournement le plus tardif était 2022, ce qui est contre-intuitif lorsqu'on considère que cette année a été globalement précoce.

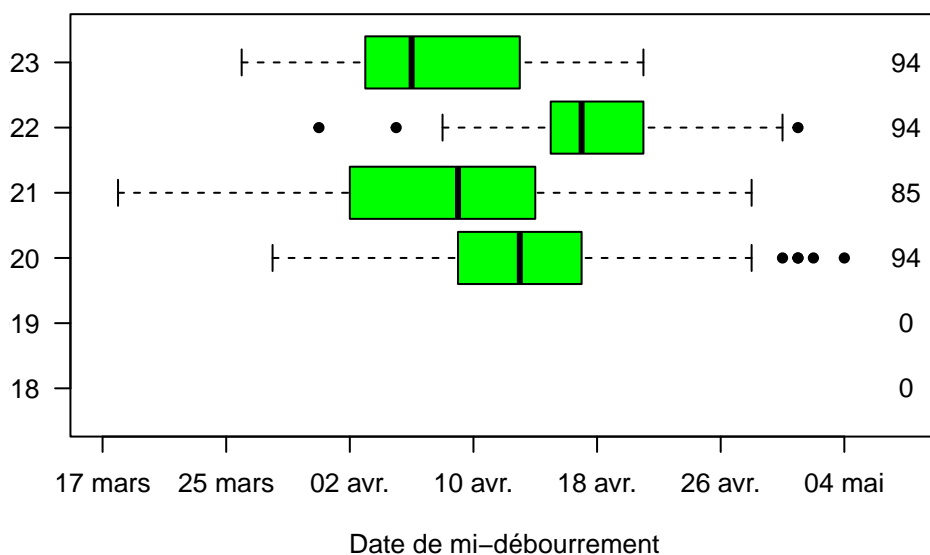


FIGURE 16 – Dates de mi-débourrement observées sur le réseau de 2020 à 2023 (effectifs montrés à droite).

— Date de mi-floraison :

La mi-floraison se déroule généralement à la fin du mois de mai sur le réseau, mais en 2019 elle a débuté le 5 juin. Pour les millésimes 2018, 2022 et 2023, la période de mi-floraison a été resserré, durant une dizaine de jours. En 2020, la floraison est un peu tardive mais surtout très étalée, durant 17 jours entre la placette la plus précoce et la plus tardive. Nous avons vu précédemment que le mois de mai était particulièrement frais en 2019 et dans une moindre mesure en 2020 aussi, ce qui explique l'étalement de la mi-floraison sur le réseau.

La durée de la période entre mi-débourrement (qui survient début avril) et mi-floraison est étroitement liée à la somme des températures, notamment les températures maximales qui ont un rôle d'accélérateur. Le modèle GFV utilisant les sommes des températures sera étudié plus amplement dans la suite du rapport.

— Date de mi-véraison :

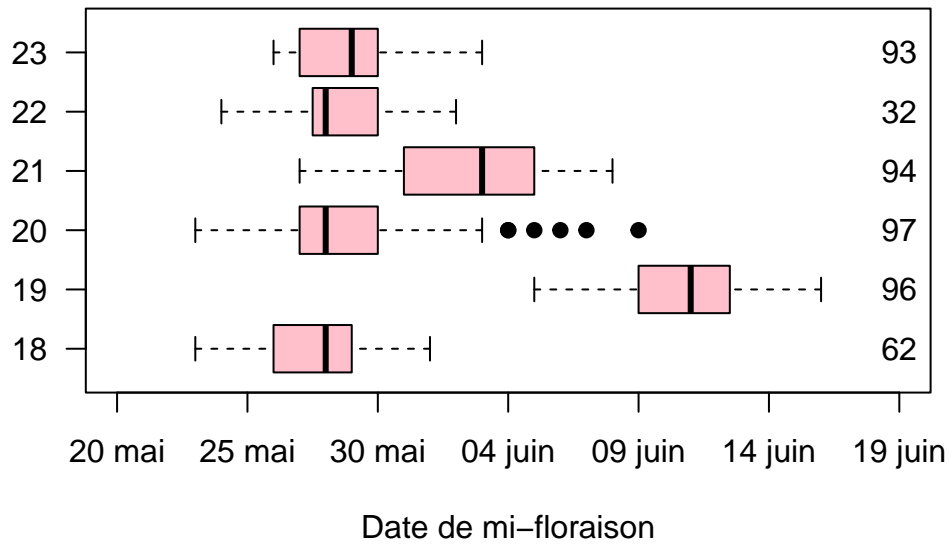


FIGURE 17 – Dates de mi-floraison observées sur le réseau de 2018 à 2023 (effectifs montrés à droite).

Les périodes de mi-véraison sont hautement variables entre millésimes. Nous distinguons les millésimes 2018 et 2022 qui sont précoces. La variabilité au sein du réseau en 2020 se retrouve à nouveau ici car l'écart entre la placette la plus précoce et la plus tardive est de 24 jours (l'écart minimal étant de 11 jours en 2019). La date de mi-véraison est influencée par les sommes de température (qui seront étudiées ultérieurement) mais aussi par la physiologie de la vigne (nutrition azotée et hydrique).

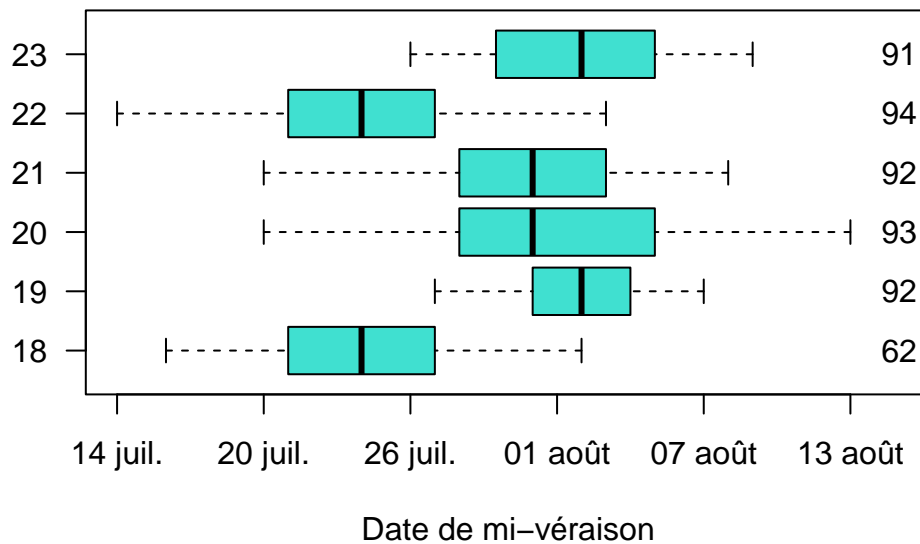


FIGURE 18 – Dates de mi-véraison observées sur le réseau de 2018 à 2023.

3.1.2 Alimentation en azote

L'alimentation en azote a été évaluée par deux mesures : l'azote foliaire par Ntester et l'azote assimilable dans les baies par dosage lors du contrôle de maturité commun. Nous affichons les relations entre ces deux mesures par millésime sur la Figure 19. Nous voyons que la corrélation entre azote foliaire et azote des baies varie : elle est élevée en 2018, 2021 et 2022, mais pas pour les autres millésimes. En 2019, la teneur en azote assimilable est variable alors que les valeurs de Ntester sont plutôt restreintes.

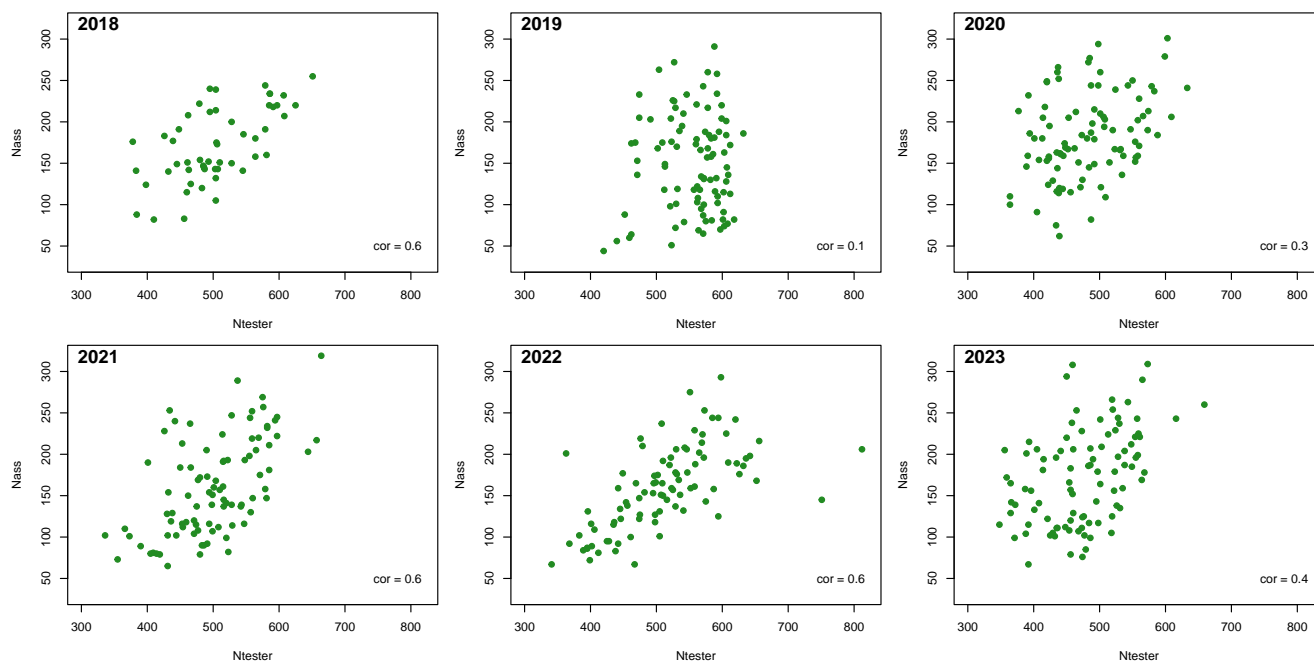


FIGURE 19 – Relations entre mesures de azote assimilable et Ntester par millésime.

La teneur en azote assimilable est une mesure particulièrement d'intérêt car elle témoigne de l'azote disponible pour la fermentation. Les boîtes à moustache de la Figure 20 montrent que la gamme de valeurs prises au cours du programme Terroir est assez similaire, avec une valeur moyenne de 165 mg/L et des valeurs variant entre 50 mg/L et 300 mg/L. Lorsque nous lions les points par placette nous voyons qu'il y a une variabilité entre années pour une même placette, car elle peut prendre des valeurs très différentes en fonction du millésime. L'écart-type intra-placette minimal est de 7.8 (ALER01_02) et le maximum de 106.0 (ALER06_03). Puisque ces variations sont assez aléatoires, nous pensons que les azotes témoignent de pratiques de fertilisation ou de conduite de la vigne (ex : enherbement).

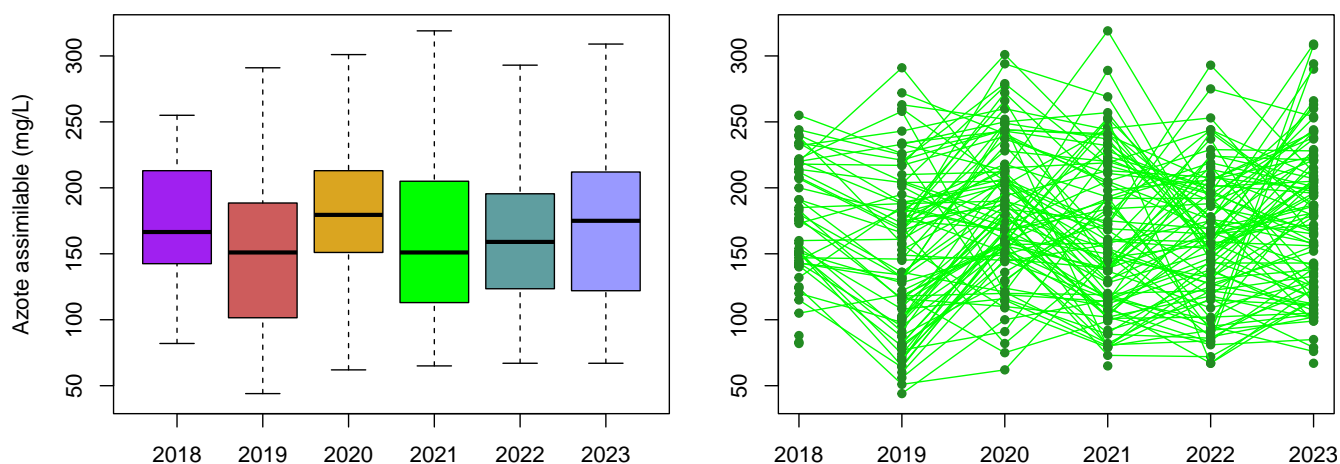


FIGURE 20 – Distribution des teneurs en azote assimilable par millésime (à gauche) et liens entre valeurs par placette (à droite).

3.1.3 Déficit hydrique

Le déficit hydrique ressenti par la vigne est le résultat de :

- la réserve utile du sol et la capacité du sol à restituer l'eau
- le climat du millésime
- l'âge et la vigueur de la vigne
- les pratiques de culture, à savoir notamment la présence ou non d'irrigation

Le déficit hydrique a été quantifié à deux moments de la saison de végétation :

- de manière précoce grâce à l'étude de l'arrêt de croissance : cet indicateur sert généralement à estimer la date où 50% des apex sont à arrêt de croissance, mais au vu de la variabilité de l'arrêt de la croissance sur ce réseau, il a été difficile d'encadrer cette date pour toutes les placettes et pour tous les millésimes (voir données brutes dans la Figure 23). Nous avons donc utilisé ces observations pour calculer **le taux d'arrêt de croissance à mi-véraison** (Figure 21). Nous voyons qu'à mi-véraison, la croissance est variable sur le réseau : en 2021 certaines placettes sont encore en pleine croissance (0% des apex en arrêt) et certaines sont à arrêt total (100% des apex). La médiane des valeurs est semblable par année, mise à part 2020 où l'arrêt de croissance est plus avancée à mi-véraison. Ceci est étonnant au vu du caractère variable et tardif de ce millésime. (Par ailleurs, l'irrigation n'a pas été moindre en 2020).
- durant la période de maturation des baies avec le $\delta^{13}C$, qui témoigne du rapport C^{13}/C^{12} qui varie en fonction de l'eau à disposition lors de la fixation des sucres (Figure 22).

Remarque : la présence d'irrigation sur le réseau Terroir permet à la fois d'observer la réponse de la vigne en conditions représentatives des pratiques de culture sur la zone, mais d'un autre côté elle masque l'expression pure du terroir, c'est-à-dire l'influence pure du climat et du sol sur la physiologie de la vigne, et rend plus difficile la qualification du terroir du réseau à but de transposition sur d'autres zones.

Nous pouvons observer le lien entre ces deux indicateurs de déficit hydrique en regardant l'évolution de l'arrêt de croissance par placette (Figure 23). Les droites sont coloriées en fonction de la valeur de $\delta^{13}C$, qui sera mesuré plus tard dans la saison. Les parcelles en déficit hydrique élevé (donc non irriguées) sont en déficit précoce, avec des indices d'arrêt de croissance élevés lors de la mi-véraison. Quant aux parcelles ayant des faibles contraintes tardives (droites coloriées en bleue), nous remarquons un gradient de déficit précoce (position de la droite plus ou moins élevée sur le graphique). Cela peut signifier que certaines placettes étaient en déficit précoce et ont été arrosées, mais ne le sont plus pendant la maturation.

Pour comprendre ce qui impacte le déficit hydrique précoce, à savoir l'irrigation et l'azote foliaire, nous modélisons l'arrêt de croissance estimé à mi-véraison. Les relations entre les données brutes sont affichées dans la Figure 24.

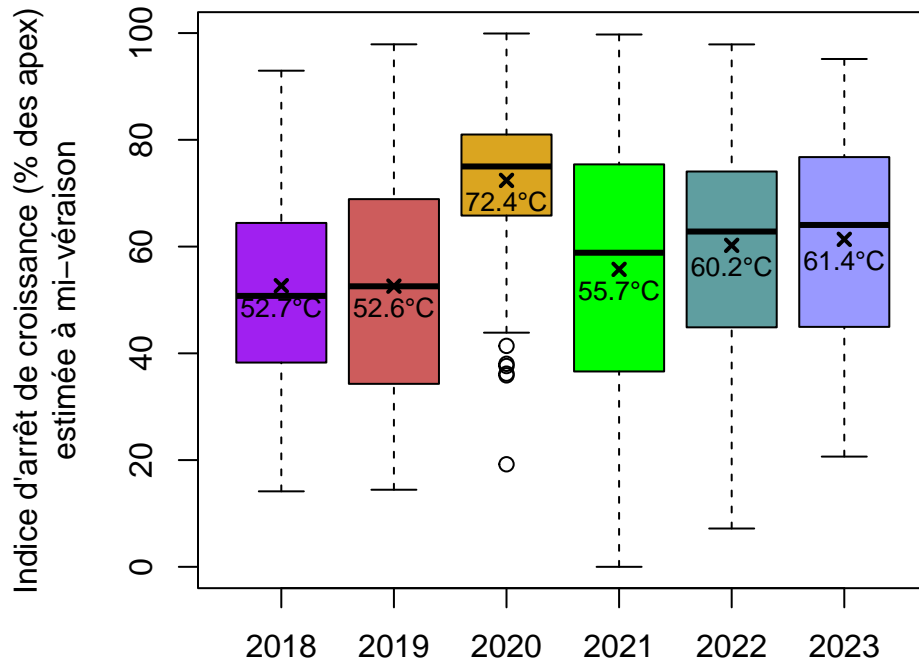


FIGURE 21 – Indice d'arrêt de croissance (%) estimée à la date de mi-véraison de la placette, par millésime.

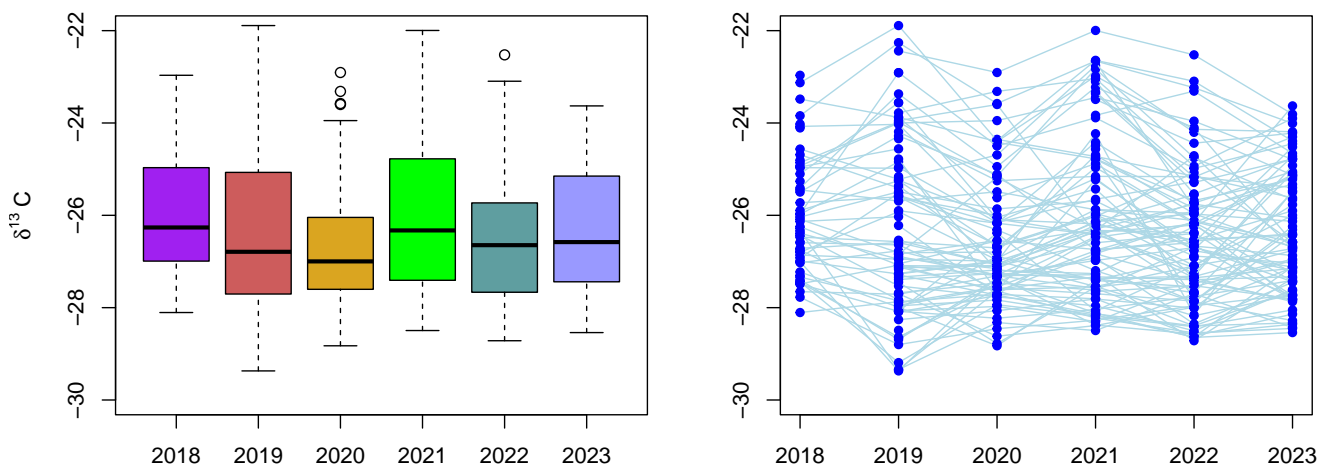


FIGURE 22 – Distribution des valeurs de $\delta^{13}C$ par millésime (à gauche) et liens entre valeurs par placette (à droite).

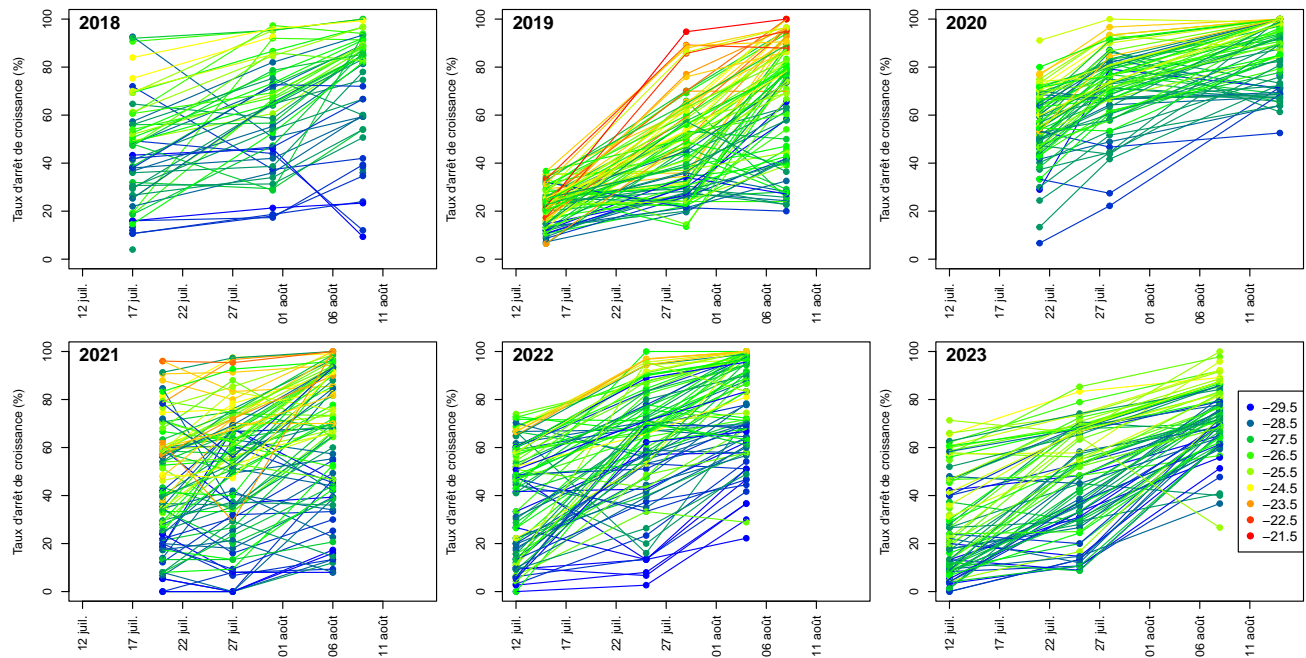


FIGURE 23 – Evolution de l’arrêt de croissance évaluée par placette et lien avec le $\delta^{13}C$ mesuré en fin de saison.

Nous observons des taux d’arrêt de croissance plus élevés sur des parcelles irriguées ce qui est cohérent pour un indicateur de déficit hydrique précoce. Cependant nous observons aussi une relation linéaire entre Ntester et taux d’arrêt de croissance. Nous validons ce constat en modélisant le taux d’arrêt de croissance par modèle linéaire à effets aléatoires (résultats non affichés).

La modélisation du taux d’arrêt de croissance à mi-véraison montre que :

- l’irrigation (oui/non) a un effet significatif sur le taux d’arrêt de croissance à véraison avec -7% d’arrêt en moyenne sur les parcelles irriguées que sur les parcelles non irriguées. Cet effet n’explique que 5% de la variance, ce qui paraît assez faible.
- le Ntester a un effet significatif sur le taux d’arrêt de -0.1% d’arrêt par +1 de valeur Ntester : plus la nutrition foliaire est élevée, plus l’arrêt de croissance est retardé. Le modèle montre que le Ntester explique 13% de la variance du taux d’arrêt de croissance à mi-véraison. L’interaction entre le Ntester et l’année n’est pas significative, ce qui suggère un effet assez stable dans le temps de la nutrition azotée sur le taux d’arrêt de croissance.

Par ailleurs, la relation entre taux d’arrêt de croissance et $\delta^{13}C$, affichée dans la Figure 24, montre que nous avons bien une corrélation entre ces deux indicateurs de déficit hydrique. Cette corrélation semble moins forte que celle du Ntester. L’indicateur du taux d’arrêt de croissance à mi-véraison montre bien un déficit hydrique précoce (qui peut évoluer par la suite comme nous le montre la relation avec $\delta^{13}C$) mais intègre aussi un “déficit” de nutrition azotée. Les parcelles ayant de grandes valeurs de Ntester ne sont pas à arrêt de croissance à leur mi-véraison.

Ces données seront utilisées par la suite dans une analyse factorielle multiple avec les paramètres de maturité.

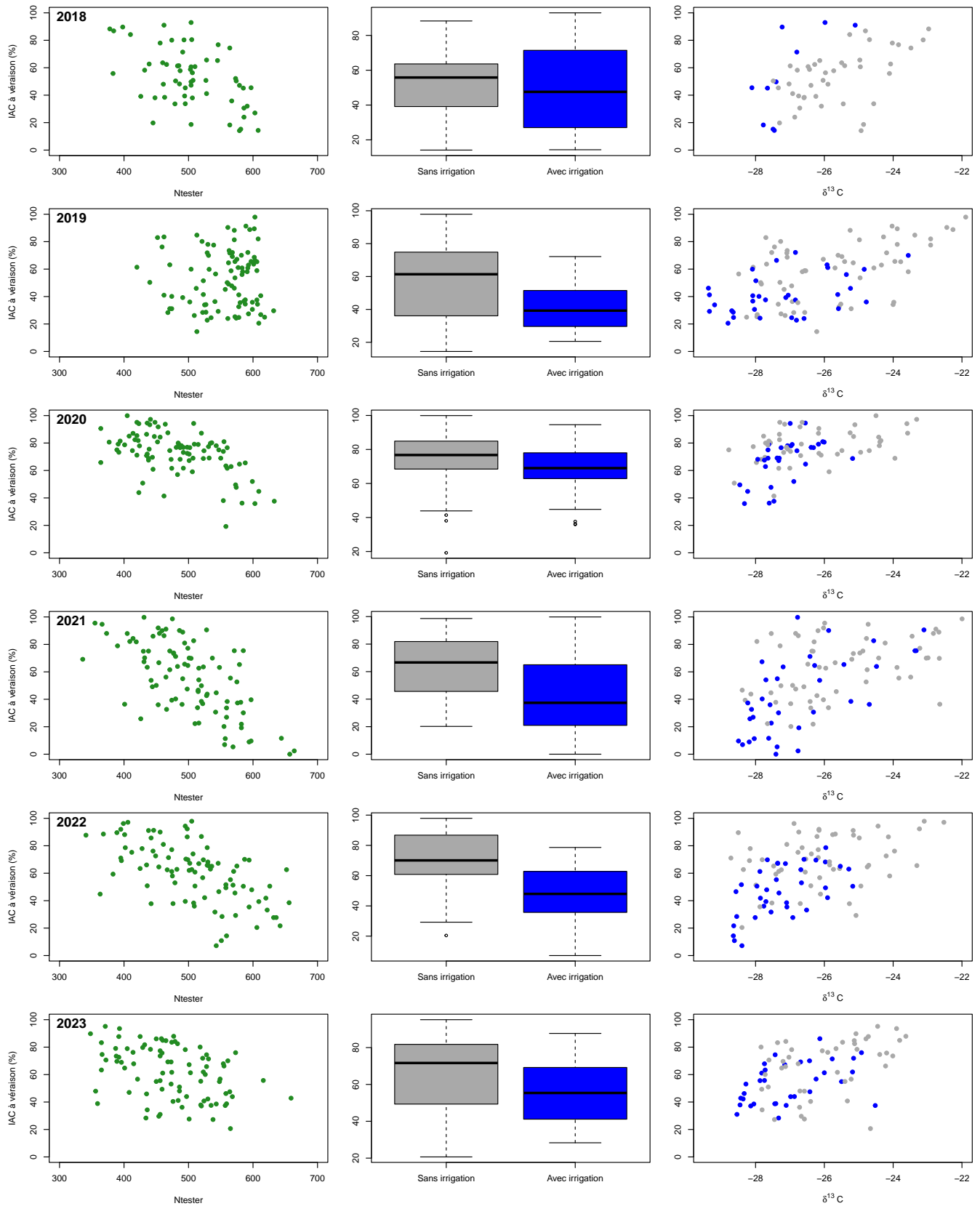


FIGURE 24 – Relations brutes entre le taux d'arrêt de croissance estimé à mi-véraison et 1) l'azote foliaire, 2) la pratique de l'irrigation et 3) le $\delta^{13}C$ mesuré en fin de saison (à titre informatif).

3.1.4 Maturité technologique des baies

— Le poids de 100 baies :

Le poids de 100 baies est affichée en dynamique sur la période de maturation dans la Figure 25, pour tous les millésimes, en fonction de la date de prélèvement. Nous voyons que toutes ces courbes sont superposées : toutes ces courbes ont une phase montante qui se stabilise entre 150 et 400g. Il n’y a pas de millésime qui se démarque particulièrement : nous voyons plutôt des placettes qui se démarquent avec des poids de baies particulièrement faibles ou élevés. Il y a une grande variabilité inter-placettes, qui semble bien plus importante que la variabilité inter-millésimes.

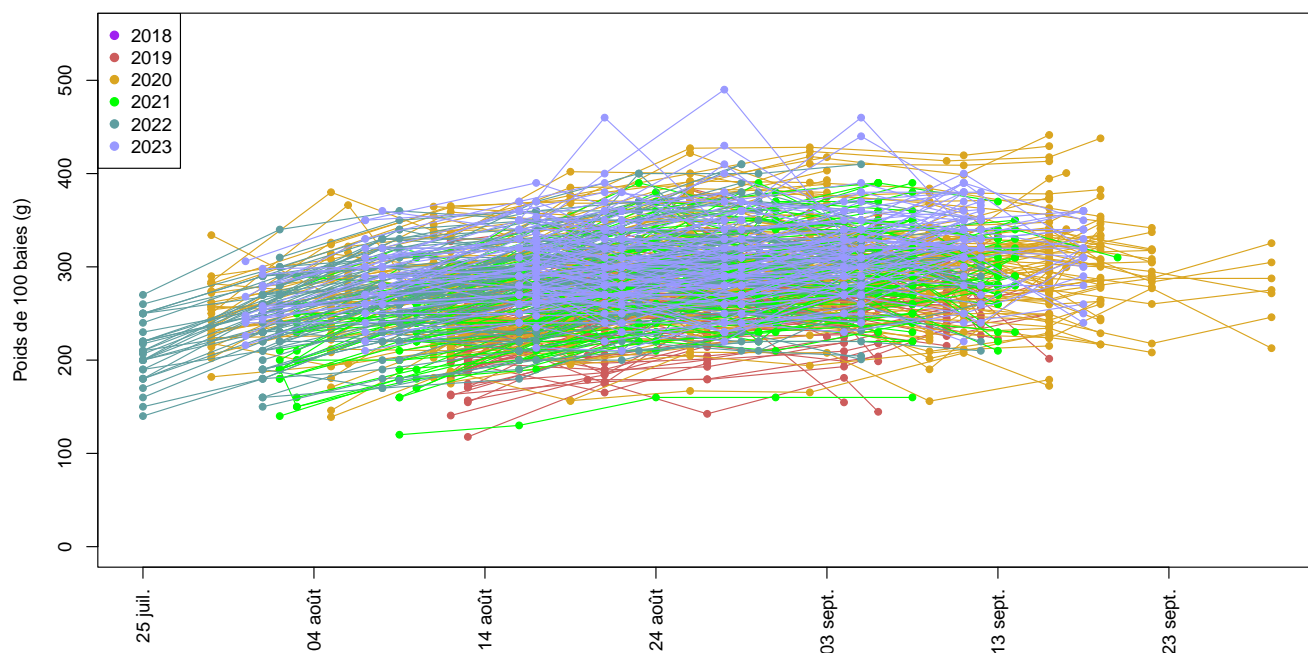


FIGURE 25 – Dynamiques d'accroissement du poids de 100 baies par millésime.

— Sucres :

La dynamique de chargement en sucres sur la Figure 26 nous montre qu'il y a à la fois une variabilité due au millésime et une variabilité due à la placette. Pour un même millésime donné, les courbes suivent une tendance similaire c'est-à-dire une partie croissante de la courbe qui dure plus ou moins longtemps avant de se stabiliser : les courbes sont similaires mais situées plus ou moins haut (variabilité inter-placettes). Nous voyons que la variabilité entre placettes est plus importante en 2020 qu'en 2023 par exemple. Par la suite nous allons étudier deux facteurs qui régissent la forme de ces formes : la vitesse de maturation et le niveau de maturation final.

Nous avons affiché en arrière plan de ce graphique des classes issues des dégustations effectuées par le CRVI. Ces profils sont approximatifs et doivent s'accompagner d'un équilibre entre tous les paramètres de maturité. Nous voyons qu'un grand nombre de placettes ne sortent pas du profil "acide", en ce qui concerne la concentration de sucres, à la fin de leur maturation (en considérant que les contrôles maturités soient faites jusqu'à vendange).

— Acidité totale :

La dégradation des acides est capturée par les courbes de la Figure 27. Le niveau initial des acidités est variable par millésime et dépend évidemment de la première date de prélèvement choisie. Certaines placettes ont un potentiel acide très élevés, allant jusqu'à 26g/L d'H₂SO₄ en 2020. La dégradation des acidités semble laborieuse en 2020. Nous voyons que la dégradation est bien plus rapide en 2022 que pour les 5 autres millésimes étudiées. Le facteur d'intérêt pour l'étude de terroir est le niveau final des acidités : nous voyons que la variabilité inter-placettes est faible (voire quasi inexistante, en 2018 par exemple). Il y a une variabilité inter-millésimes : à titre d'exemple, les acidités de 2020 sont plus hautes que celles de 2022. Malgré des millésimes chauds comme 2022 et 2023, le Vermentinu arrive à maintenir une acidité intéressante. La littérature concorde sur la sensibilité de l'acidité totale aux conditions d'alimentation hydrique.

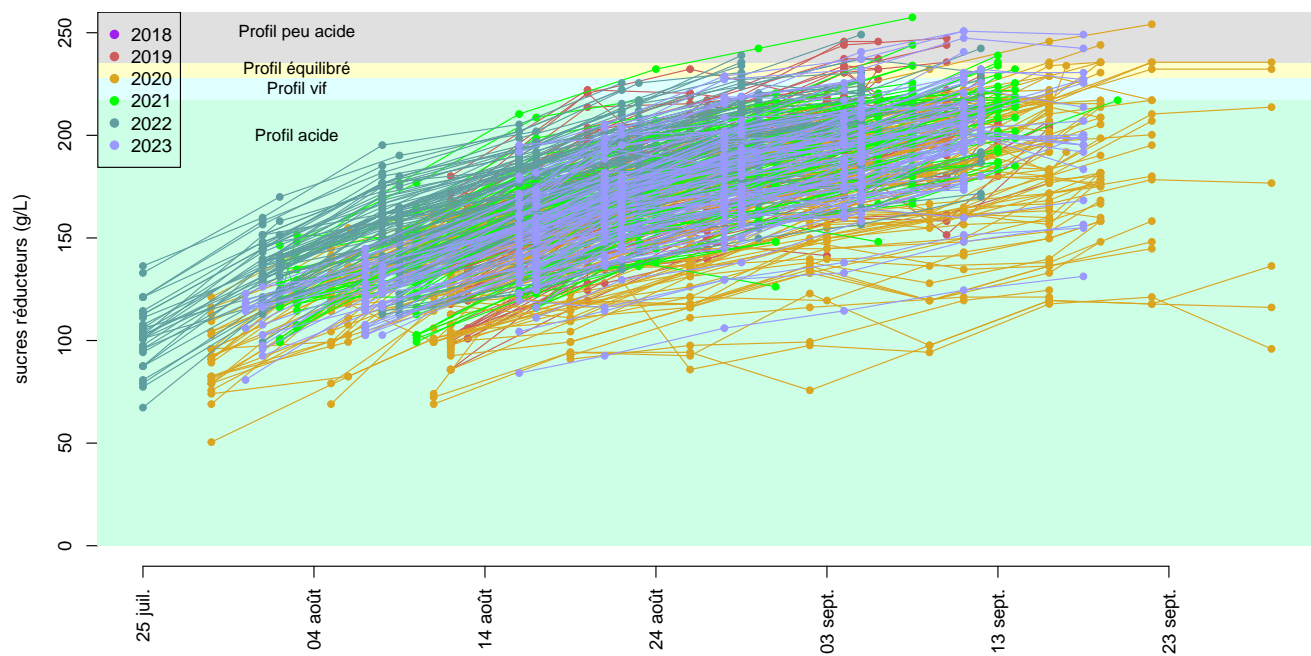


FIGURE 26 – Dynamiques de chargement en sucres par millésime.

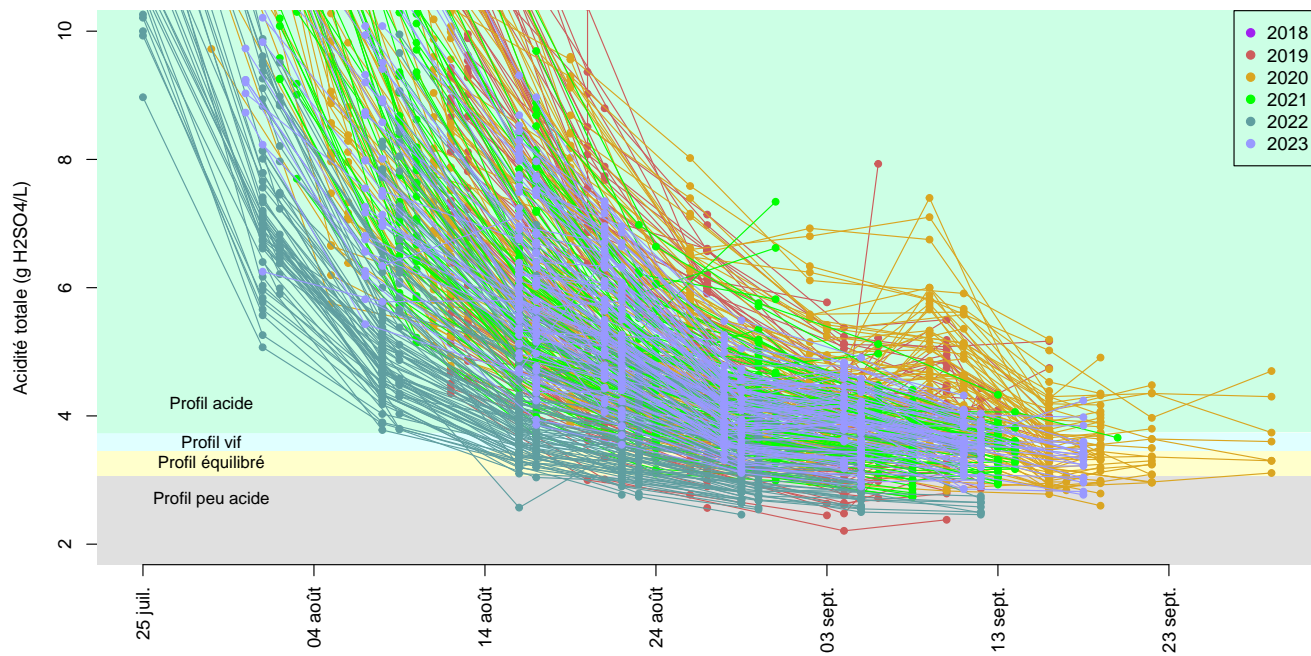


FIGURE 27 – Dynamiques de dégradation des acides par millésime.

— Acidité malique :

Les dynamiques de dégradation de l'acide malique sont similaires à celles de l'acidité totale, mais présente plus de variabilité entre les placettes (Figure 28). La vitesse de dégradation du raisin dépend de la température du raisin, qui varie en fonction des conditions climatiques et de l'exposition du raisin (fonction des pratiques viticoles). En cas de températures élevées, les besoins énergétiques des cellules du raisin augmentent et pour maintenir l'apport énergétique, elles font appel à l'acide malique préalablement stocké.

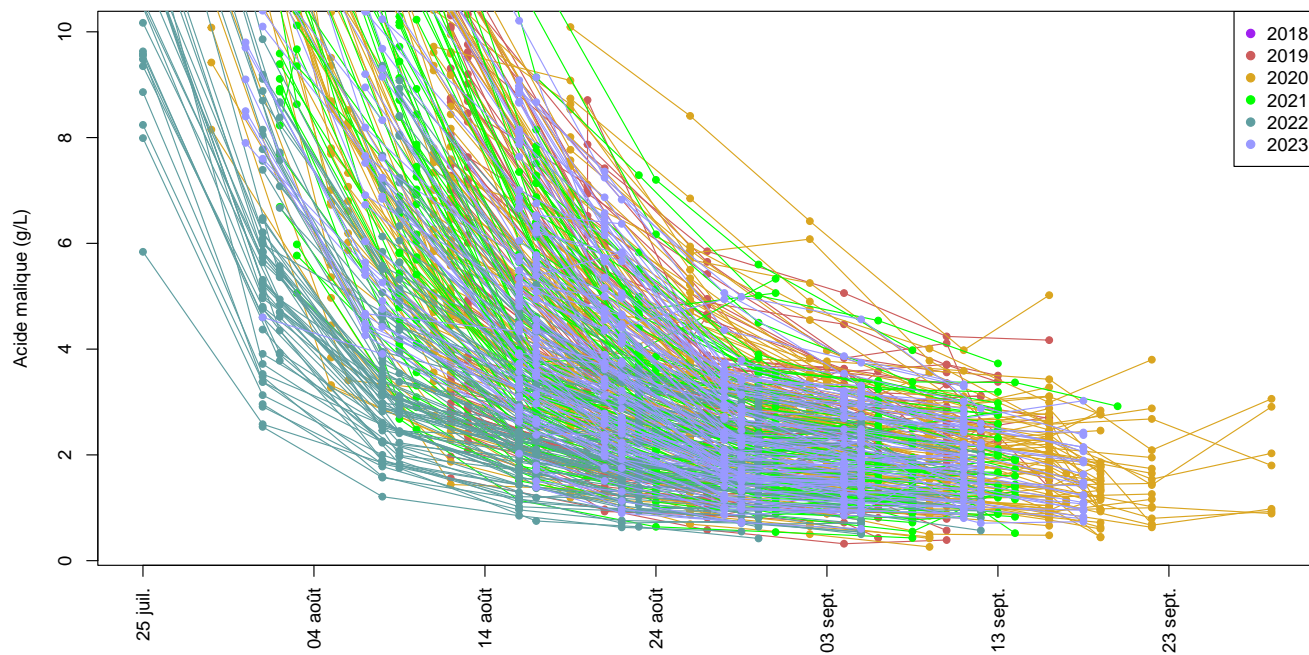


FIGURE 28 – Dynamiques de dégradation des acides maliques par millésime.

— pH :

La variabilité entre placettes est sûrement plus facile à observer sur les courbes d'augmentation du pH (Figure 29). Sur ces courbes nous voyons bien que le pH est plus élevée en 2022, où toutes les placettes basculent dans le profil peu acide. Le millésime 2023 est à cheval entre profil peu acide et profil équilibré. Il est possible que ces pH élevés soient causés par une décharge potassique causée par une situation de chaleur entre véraison et maturité. La variabilité entre placettes est très élevée en 2020.

— Modèle SR/AT :

Pour résumer les dynamiques de dégradation des acides et de concentration en sucres, nous allons étudier les dynamiques du rapport SR/AT. Il est bien connu que pendant la période de maturation, le rapport SR/AT augmente linéairement en fonction du temps, et cela se confirme sur les données du programme Terroir (Figure 30). Nous voyons cependant que la pente de la courbe, équivalente à une vitesse de maturation, est variable entre millésimes et entre placettes. Cette relation sera modélisée par la suite et l'impact du terroir sera étudié sur la vitesse de maturation, en utilisant deux échelles : le temps écoulé et les sommes de températures écoulées.

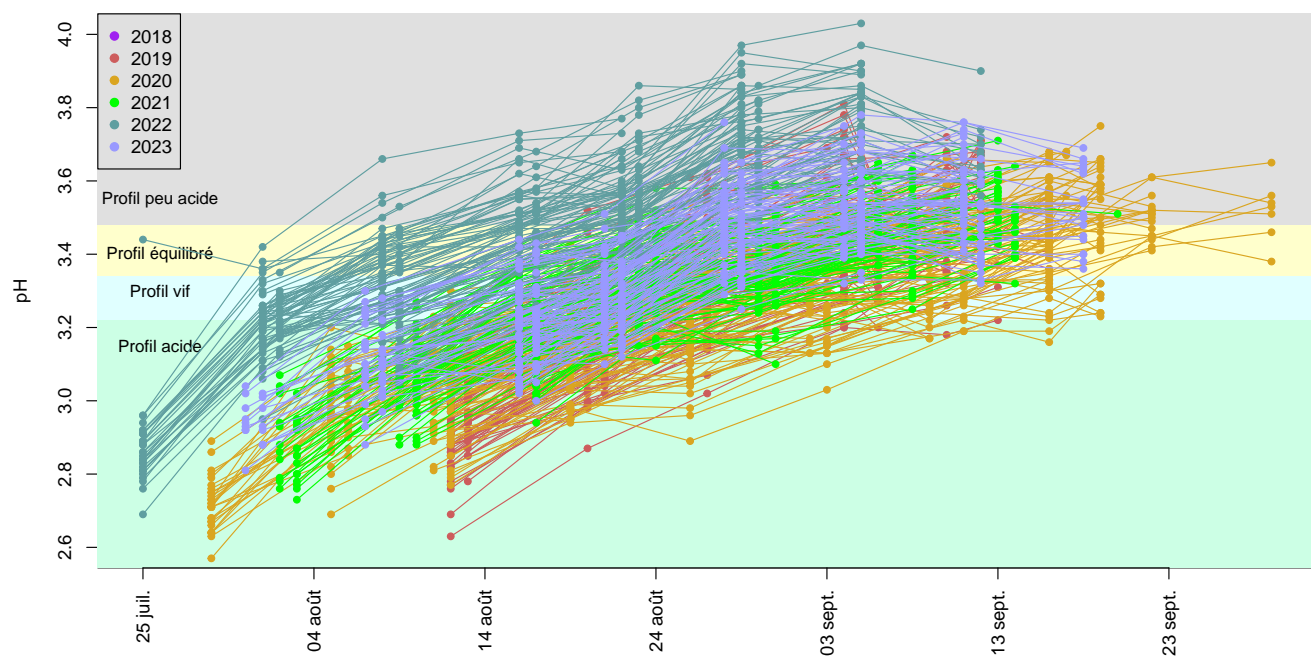


FIGURE 29 – Dynamiques d’augmentation du pH par millésime.

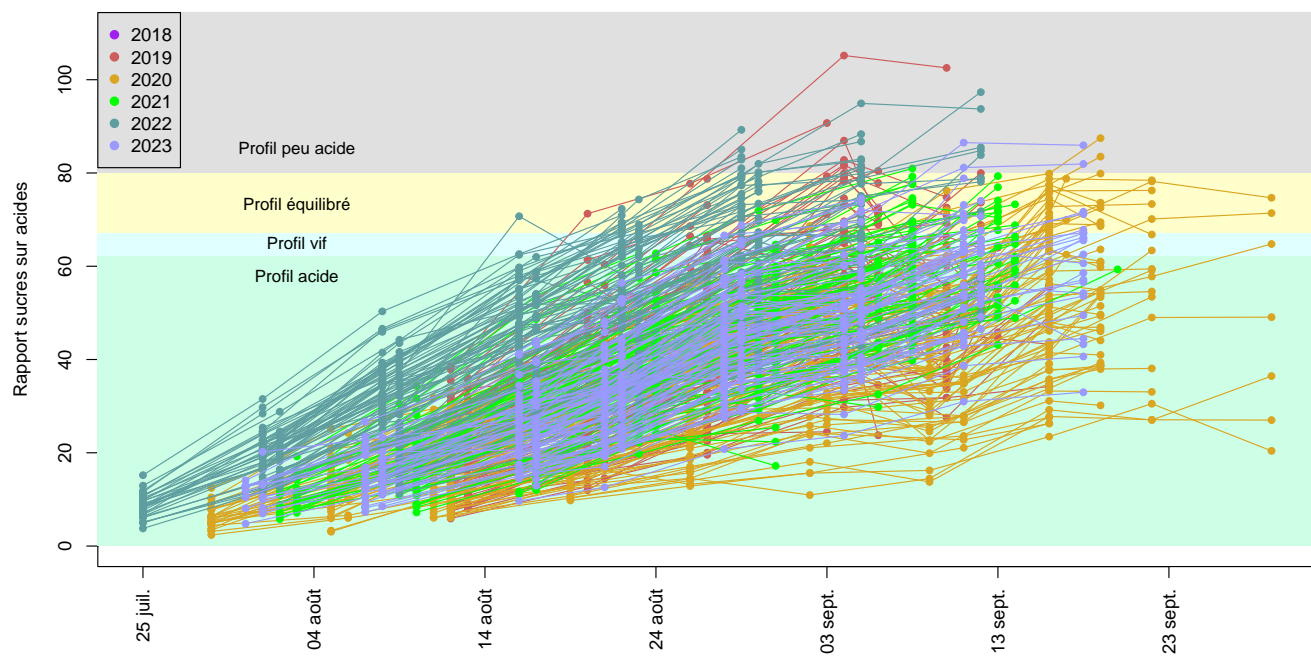


FIGURE 30 – Dynamique d’accroissement du rapport SR/AT.

3.1.5 Quantité de vendange

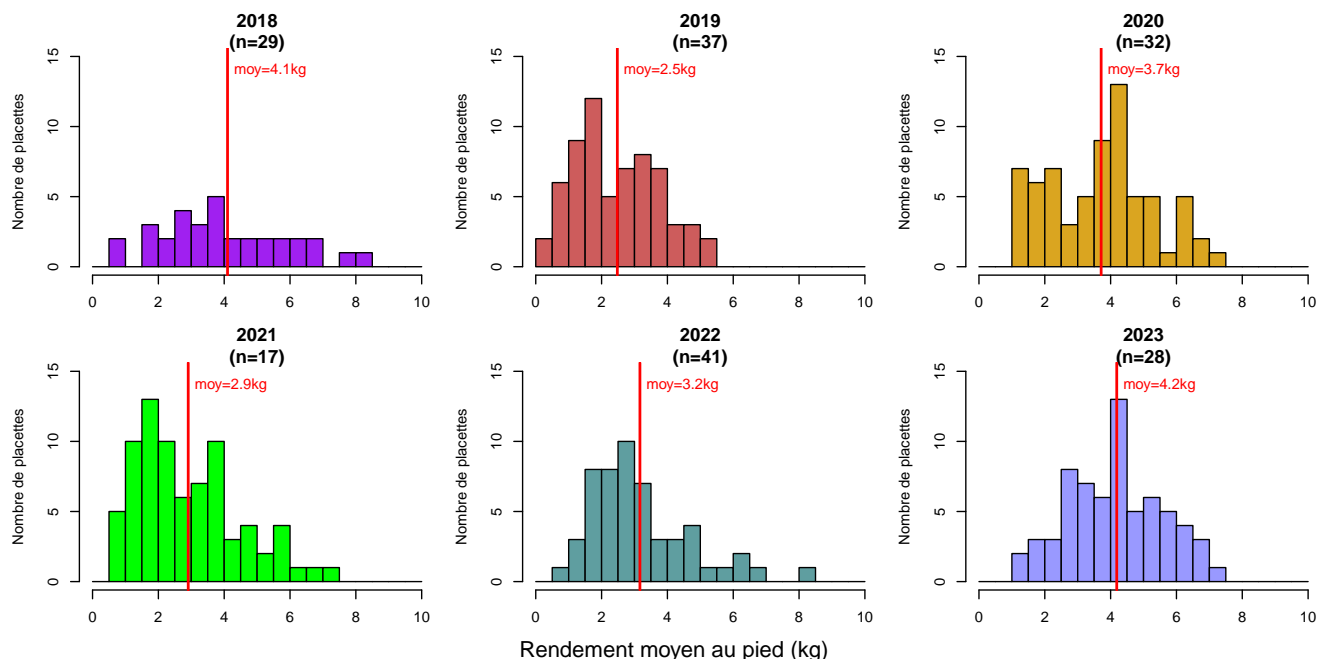


FIGURE 31 – Dynamique d’accroissement du rapport SR/AT.

Le bilan des données d’estimation de rendement a été dressé dans la première partie de ce rapport. Nous n’avons pas des valeurs de rendement pour chaque placette à chaque millésime, mais nous souhaitons établir un profil de production de chaque placette sous la forme de catégories qui puissent alimenter les analyses.

La distribution des données de rendement par millésime est affichée dans la Figure 31. Nous voyons que la moyenne par millésime est un peu variable : la moyenne la plus faible est enregistrée en 2019 avec 2.5kg en moyenne par cep et la plus élevée en 2023 avec 4.2kg par cep. Cependant ces valeurs n’ont pas été calculées sur les mêmes placettes et sont à considérer avec précaution.

Par ailleurs, nous avons été confronté à une grande variabilité des estimations de rendement pour une placette donnée, souvent difficiles à expliquer. Les écarts d’une même placette peuvent aller jusqu’à 5kg de différence entre différents millésimes. Les précisions suivantes ont été apportées par l’équipe terroir concernant les placettes avec la plus grande variabilité de rendement (évalué par l’écart-type) :

- AGH09-3 (sd = 2.0) : le rendement est élevé en 2018, mais il n’y a eu que 4 ceps pesés, donc potentiellement un manque de représentativité
- AGH13-1 (sd = 2.1) : des petits rendements enregistrés en 2020 et 2021 difficiles à expliquer, les quantité d’irrigation sont stables
- AGH17 (sd = 1.6, 2.5, 1.7 pour les 3 premières placettes) : les rendements sont moindre jusqu’en 2020 car la vigne était conduite en bio puis il y a eu changement de propriétaire et un changement de mode de conduite
- ALER04-3 (sd = 1.7) : des rendements bas ont été enregistrés en 2019 et 2022, en 2022 il y a eu des dégâts de sanglier, cela a peut être été le cas aussi en 2019
- ANTI02-1 (sd = 1.6) : en 2018, 1 cep a été pesé à 14.01 kg ce qui fait augmenté la moyenne puisque les autres ceps étaient compris en 5 et 8.. mais ce n’est pas forcément une valeur abberante, les ceps sont souvent très chargés
- ANTI05-2 (sd = 1.9) et -3 (sd = 1.9) : les variations de rendement sont liées à l’entretien de la vigne. . .
- TAL02-2 (sd = 2.3) et -3 (sd = 1.6) : le petit rendement enregistré en 2022 pourrait être lié à la sécheresse du millésime
- TAL07-1, -2, -3 (sd = 2.8, 3.4 et 1.7) : il serait souhaitable de la supprimer puisqu’elle n’a été récoltée qu’en 2018 et 2019

Nous allons donc garder les données de rendement sous forme annuelle, car il est difficile d’envisager un classement des placettes. Les données de rendement seront utilisées dans l’analyse factorielle multiple pour alimenter l’inter-

prétation. Dans la Figure 32, nous voyons que le rendement varie en fonction de l'âge de la parcelle pour plusieurs millésimes mais ceci n'est pas systématique : l'effet de l'âge sur le rendement n'est pas statistiquement significatif en 2023 ($p=0.1$).

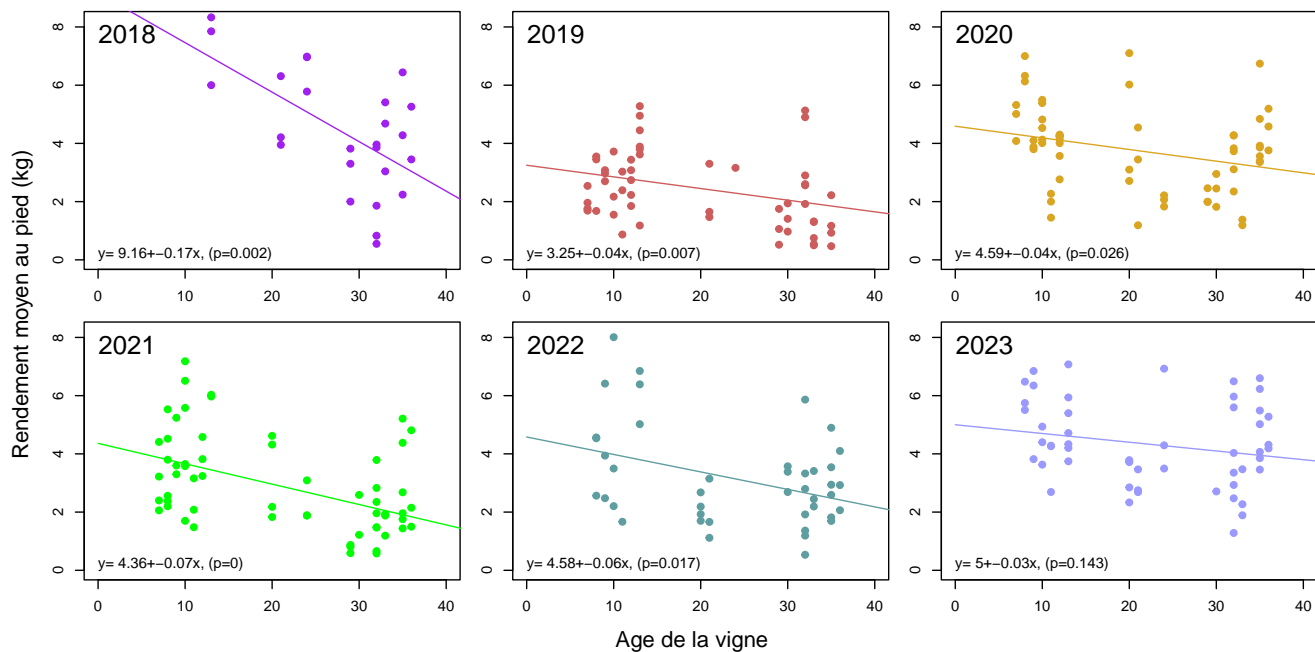


FIGURE 32 – Relations linéaires entre rendement moyen au cep et âge de la parcelle par millésime.

3.2 Ajustement de modèles phénologiques

— Modèle GFV :

Comme précisé dans la première partie de ce rapport, les températures sont le premier catalyseur du développement végétal. Il est possible de prédire différents stades de développement de la vigne grâce à des sommations thermiques. Ces sommations sont des estimations, et d'autres facteurs du terroir (ressources, pratiques de culture. . .) impactent à leur tour la phénologie de la vigne.

Le modèle GFV a été paramétré pour divers cépages, dont le Vermentinu, mais sur assez peu de points. Ce modèle somme les températures moyennes depuis le 1er mars, et indique la sommation des températures nécessaires pour arriver à la floraison ou à la véraison.

Depuis le début du programme Terroir, seules les données de températures depuis le 1er avril ont fait l'objet de corrections pour intégrer les bases de données climatiques. Cependant dans le but de travailler sur les dates de mi-débourrement, nous avons accès à une base de données formatée sur les températures hivernales en 2022. Le modèle de Parker sera éprouvé sur ces données, afin de décider si l'utilisation de ce modèle est d'intérêt dans le cadre de ce programme, suite à quoi il faudrait récupérer et mettre en forme les données hivernales pour les autres millésimes.

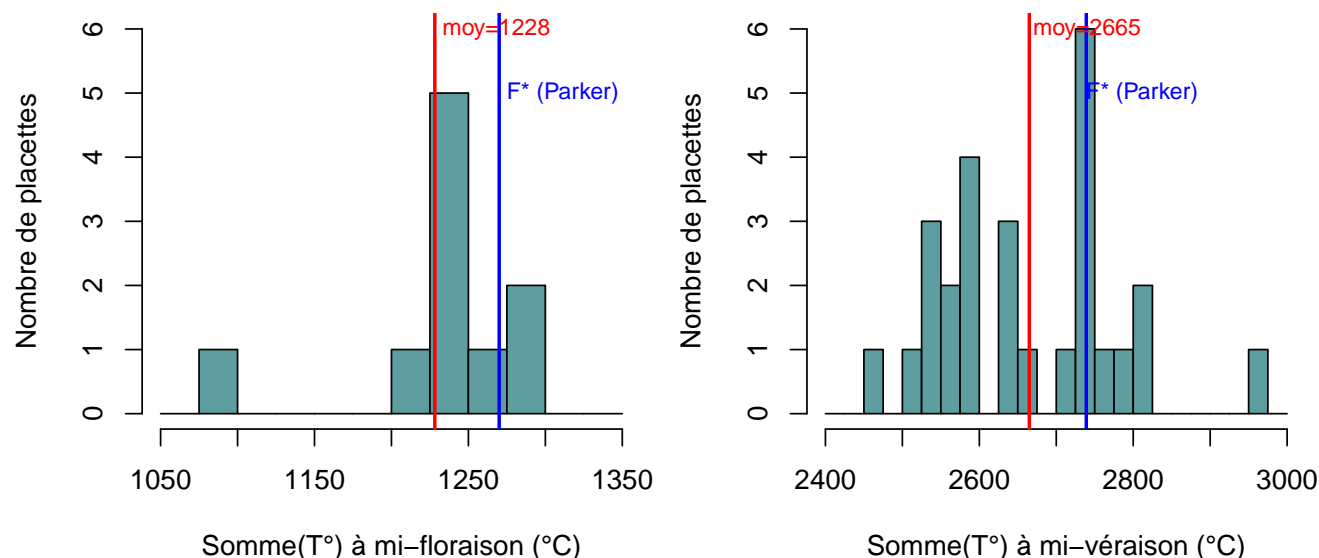


FIGURE 33 – Sommes de température recensées à la mi-floraison et à la mi-véraison en 2022.

Pour la floraison, d'après *Parker et al., 2013*, la somme de températures à atteindre est égale à $F^* = 1270^\circ\text{C}$ (calculée sur 2 observations uniquement!). Malheureusement, en 2022 la date de mi-floraison a été déterminé que pour 10 placettes équipées de capteur. Pour ces 10 placettes, les sommes de température calculées sont légèrement inférieures à 1270 : nous calculons $F^* = 1228^\circ\text{C}$ ce qui représente 42°C de différence, donc 2-3 jours de décalage de la mi-floraison.

Pour la véraison, nos données sont plus complètes. Parker prévoit $F^* = 2739^\circ\text{C}$ calculé sur 23 observations. Nous estimons plutôt une moyenne de 2665°C donc une différence de 74°C (3-4 jours). Cependant on a certaines placettes ayant des degrés jours bien plus faibles, par exemple 2460°C à la véraison c'est-à-dire une différence de 279°C accumulés.

— Modèle GSR :

De la même manière que pour le modèle GFV, il existe un modèle de prévision de la concentration en sucres (*Parker et al., 2020*). Ce modèle vise à prédire une certaine concentration cible en sommant les températures moyennes depuis le 1er avril. Ce modèle est calibré par cépage, et il n'a jamais été calibré pour le Vermentinu. Nous avons les données nécessaires dans le programme Terroir pour le faire.

La Figure 34 montre les sommes de température recensées sur les placettes de 2019 à 2023, jusqu'à une date estimée où les placettes atteignent respectivement 180 ou 200g/L de sucres. Nous voyons que la somme des températures

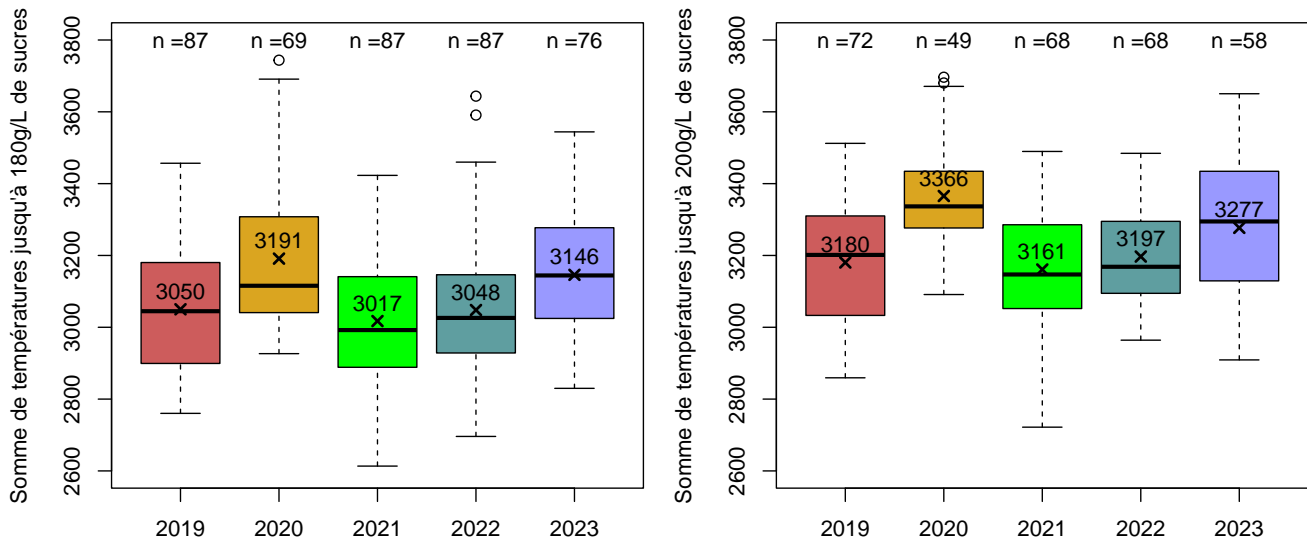


FIGURE 34 – Sommes de température recensées lors de l'accumulation de 180g et 200g de sucres, avec le nombre de placettes concernées par l'estimation.

semble dépendre du millésime : il y a plus de températures accumulées en 2020 et en 2023 que les autres millésimes. Il faut plus de cumul de température pour arriver à une même concentration : l'accumulation en sucres est freinée par d'autres facteurs. Nous allons explorer ces facteurs en modélisant la vitesse de maturation.

3.3 Structuration des jeux de données écophysio au cours des millésimes par analyse factorielle multiple (AFM)

Nous avons affaire à un jeu de données complexe et répété sur plusieurs millésimes. Les mêmes placettes ont été observées. Nous pouvons donc étudier l'évolution de la variabilité de ce jeu de données entre les millésimes, afin de répondre aux questions suivantes :

- la variabilité expliquée par les variables est-elle constante ?
- les corrélations entre les variables sont-elles identiques entre millésimes ?
- les placettes se comportent-elles de la même manière entre les millésimes ?

Pour cela nous procédons à une **analyse factorielle multiple** (AFM), qui est une ACP imbriquée : une ACP est conduite sur chaque jeu de données annuelle, puis une ACP globale permet de regrouper ces ACP sur les mêmes composantes principales. Pour faciliter la lecture, nous projetons les coordonnées des individus et des variables séparément par millésime mais il faut noter qu'il s'agit des mêmes composantes principales (dimensions).

3.3.1 Cercle des corrélations

Ci-dessous sont représentées les cercles de corrélation des variables considérées par millésime, avec les mêmes composantes principales globales (dimensions 1 et 2). Pour information, ce premier plan explique 55 à 60% de la variance des données pour chaque millésime.

Notre premier constat est que la structure interne de chaque ACP est similaire : les comportements sont redondants, les variables sont corrélées de la même manière tous les ans à quelques exceptions près. Il y a cependant des changements subtils entre millésimes :

- le $\delta^{13}C$ est plus corrélé aux sucres et au rapport SR/AT en 2018, 2021 et 2022 qu'en 2019 et 2020
- le Ntester n'est pas corrélé aux autres variables de vigueur (azote assimilable, SECV) en 2019
- la date d'atteinte des 180 mg/L en sucres n'est pas très corrélée aux dates de floraison et de véraison, ce qui peut sembler illogique : la vitesse de maturation n'est pas coordonnée avec la précocité. D'autre part, l'indice d'arrêt de croissance estimé à véraison n'est pas corrélé aux variables décrivant la phénologie (miflo, miver, date 180g sucres)
- il y a une anti-corrélation entre la SeCV et l'azote foliaire (Ntester) avec l'indice d'arrêt de croissance estimé à véraison : les placettes avec une forte nutrition azotée ne font pas un arrêt de croissance, comme nous avons vu précédemment
- l'altitude et la distance à la mer sont positivement corrélées à la deuxième dimension, dans le sens des poids de baie élevés ; il n'y a pas de corrélation visible entre les paramètres de maturité et les variables de topographie.

3.3.2 Projection des individus

La Figure 36 représente la répartition des individus dans le premier plan factoriel avec les coordonnées globales (en noir) et partielles (en couleur). Chaque individu est au barycentre de ses coordonnées partielles. Certaines placettes ont des coordonnées partielles proches et donc des profils millésimés similaires ; d'autres ont des coordonnées partielles éloignées, cela signifie que leur profil est plus variable entre les millésimes. Nous allons étudier l'inertie inter-millésime par la suite.

Pour interpréter la position des individus dans cet espace factoriel, nous pouvons apporter des informations supplémentaires. La Figure 37 représente les coordonnées partielles par millésime, avec une coloration en fonction du rendement de l'année. Les placettes pour lesquelles nous n'avons pas d'estimation de la charge sont représentées en gris. Nous nous attendions à un regroupement des placettes par rapport à leur charge, et nous en avons l'impression pour les millésimes 2018, 2019 et 2022 : les placettes les moins chargées sont plutôt à gauche (sens des concentrations élevées en sucres et des parcelles ayant un arrêt de croissance avancé à véraison) et les plus chargées à droite (haute nutrition azotée, hautes acidités).

Nous pouvons représenter les points (en coordonnées partielles) en fonction de l'âge de la vigne (Figure 39). Nous voyons une polarisation des placettes en fonction de leur âge : les jeunes placettes sont situées à droite vers le bas (acidités élevées, phénologie retardée) et les parcelles plus âgées vers la gauche (profils sucrés). Ce constat est similaire lorsqu'on colorie les placettes en fonction de la destination de la production (Figure 38).

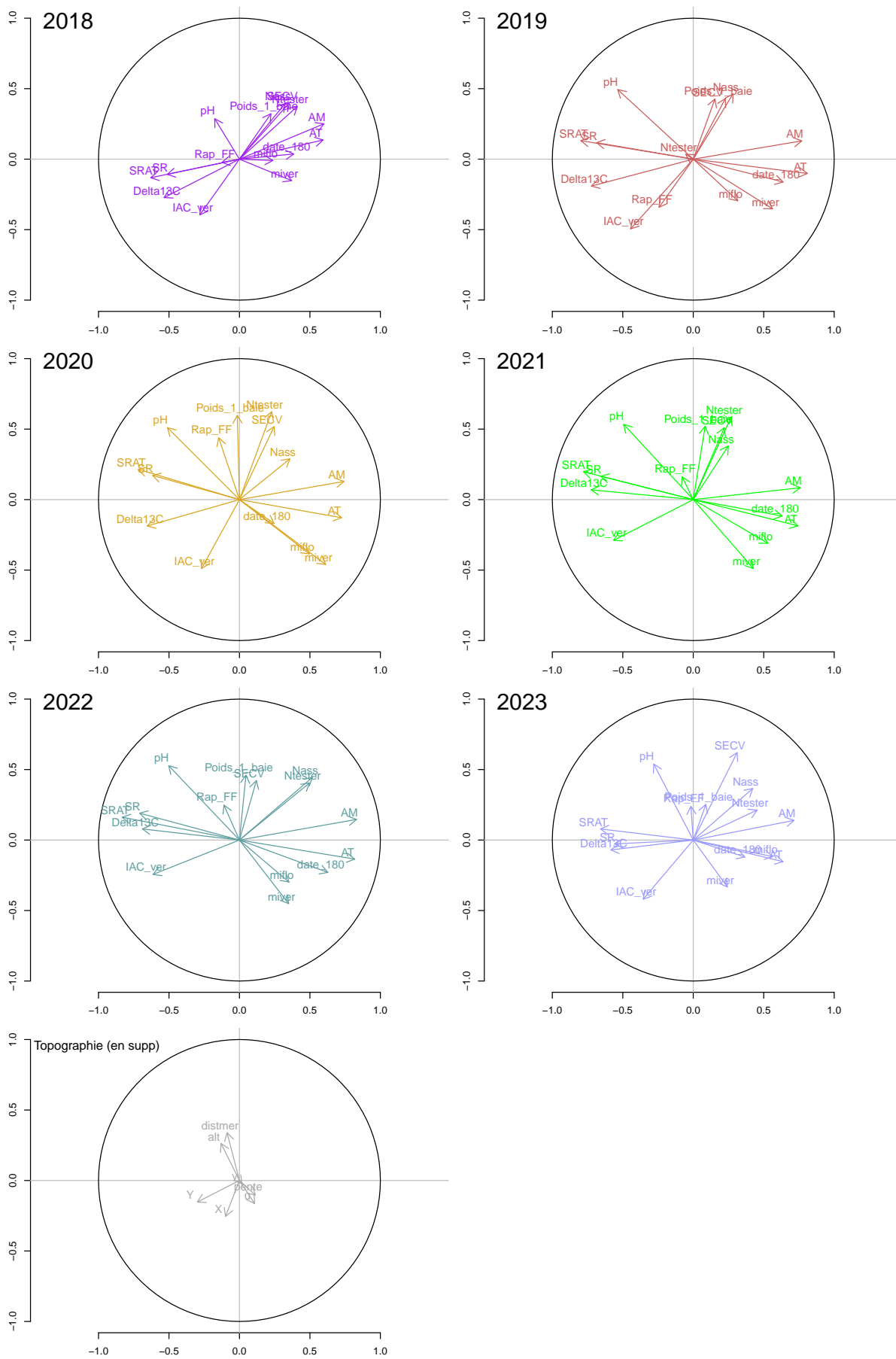


FIGURE 35 – Cercle des corrélations de l'analyse factorielle multiple affichée par groupe sur le premier plan factoriel : chaque millésime de 2018 à 2023 et les variables de topographie incluses en variables supplémentaires.

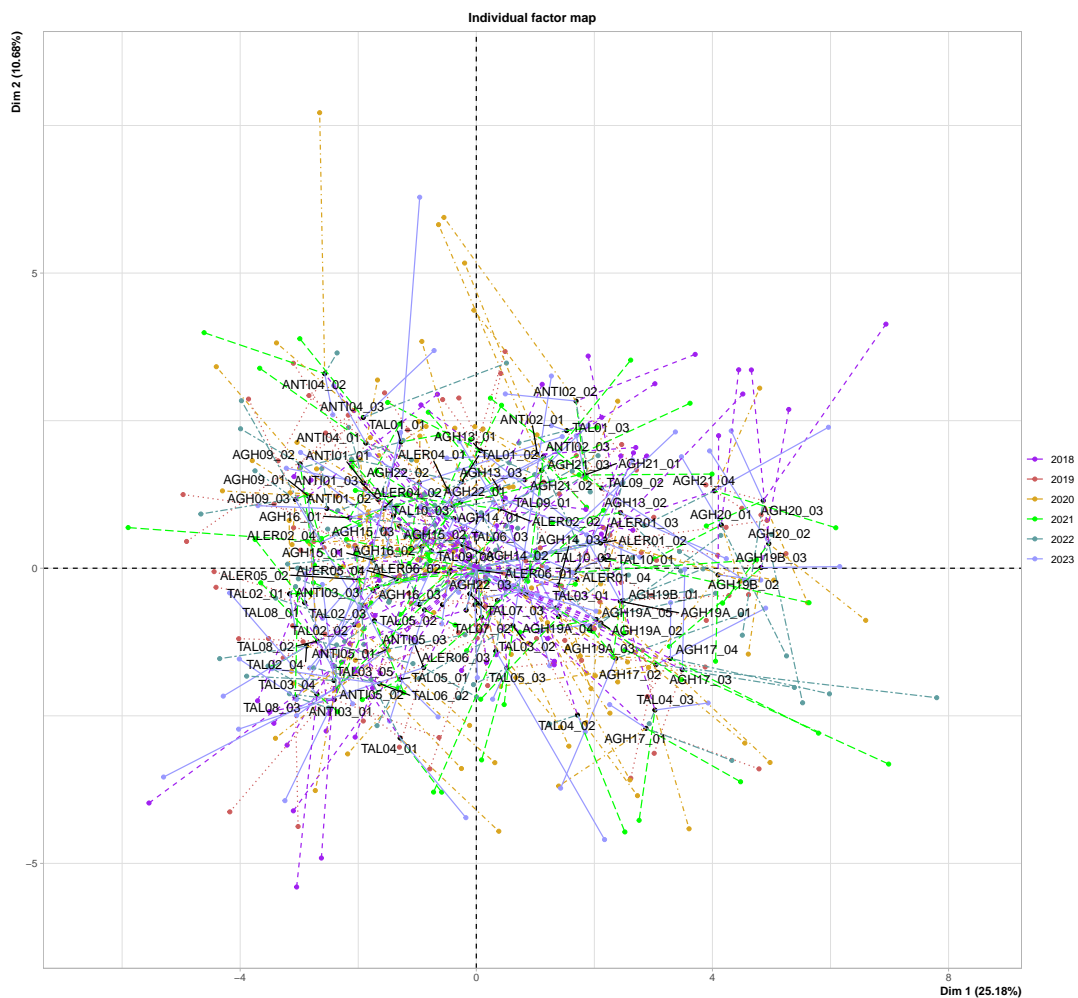


FIGURE 36 – Projections globales (en noir) et partielles (par millésime, en couleur) des individus de l'AFM.

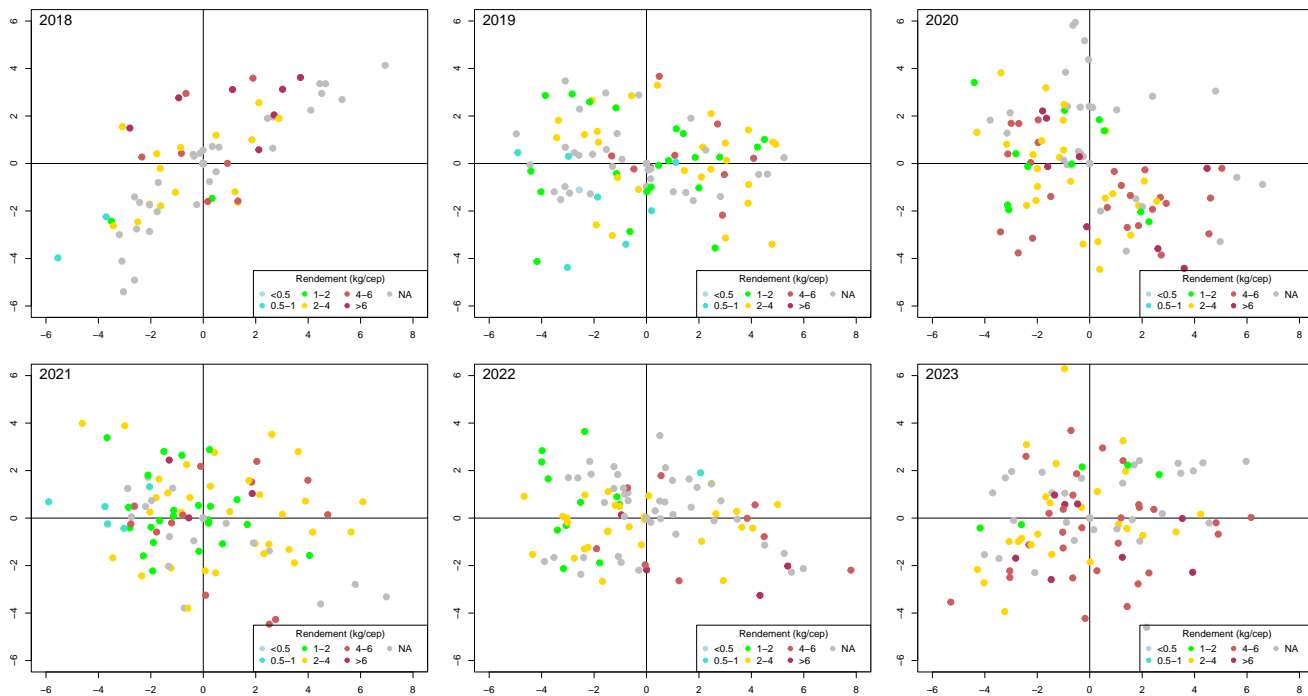


FIGURE 37 – Projections partielles par millésime des placettes dans l’AFM en fonction du rendement mesuré sur la placette.

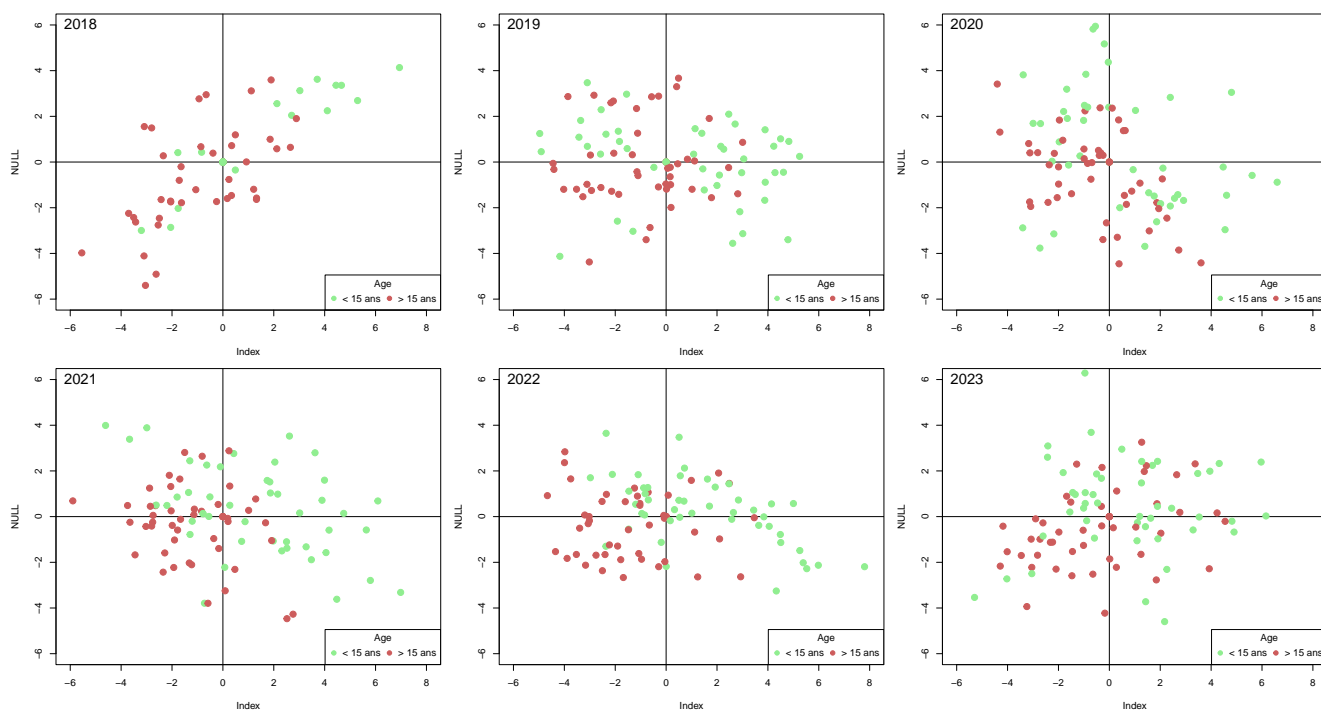


FIGURE 38 – Projections par millésime des placettes dans l’AFM en fonction de l’âge de la vigne.

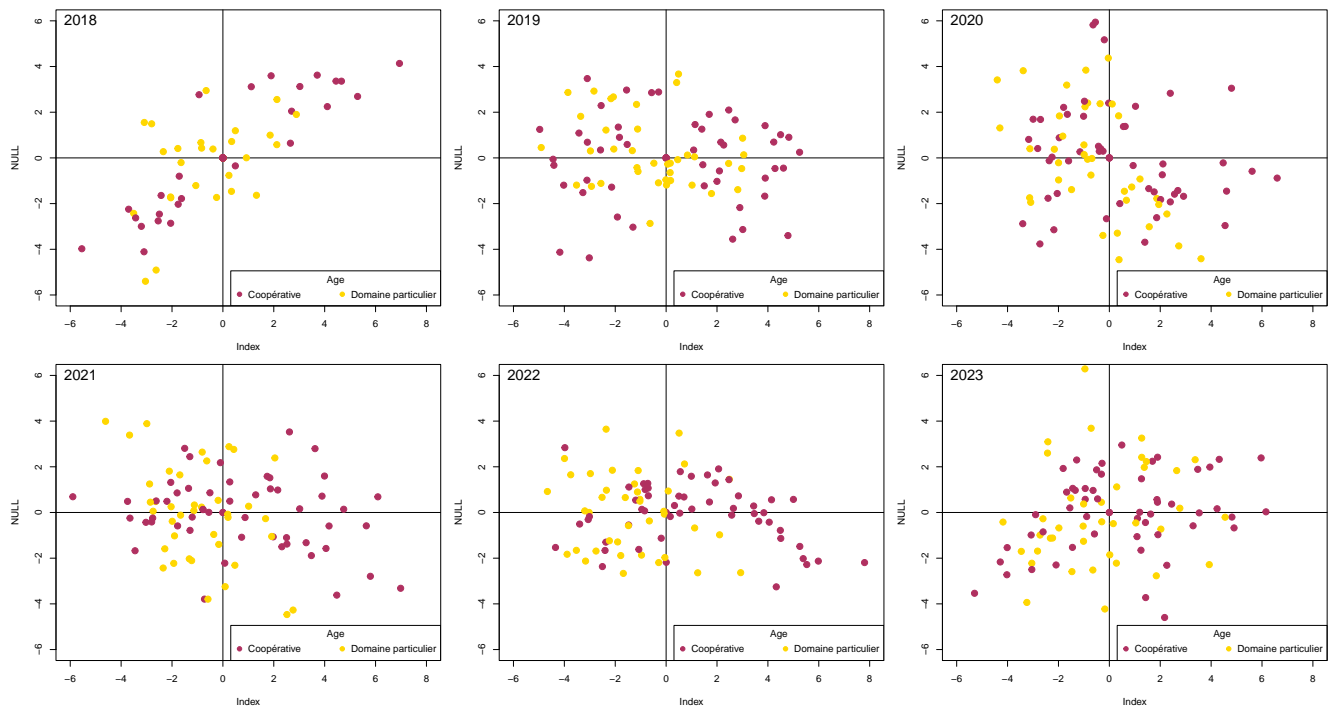


FIGURE 39 – Projections par millésime des placettes dans l’AFM en fonction de l’âge de la destination.

3.3.3 Interie intra-placettes

Avec cette analyse multiple nous pouvons identifier les placettes ayant une variabilité plus grande de réponses d’un millésime à l’autre. Les placettes AGH17, ALER01, ALER02, ANTI04, ANTI05 ont la plus grande interie intra-placettes. Les placettes des parcelles AGH15, TAL05, TAL06, TAL07, ALER06, ALER05 sont les plus stables d’une année à l’autre d’après l’AFM.

3.4 Modélisation de la vitesse de maturation

La Figure 30 nous a montré que le rapport SR/AT augmente linéairement en fonction du temps pour tous les millésimes considérés, mais avec des pentes différentes en fonction des placettes. Il semblerait que la pente de maturation soit plus sensible à des facteurs propres à la placette qu'au millésime, mais nous cherchons à valider cela.

Nous savons que la température sert de catalyseur lors de la maturation des baies : il est donc intéressant de représenter la vitesse de maturation en fonction de la somme des températures écoulées, de la même manière que *Leeuwen et al., 2023*. Si nous considérons les sommes de températures depuis le 1er avril (Figure 40) nous voyons que nous avons aussi une relation linéaire entre l'indice SR/AT et le temps thermique. Cependant cette date paraît assez arbitraire, et nous voyons que les droites ne partent pas de la même origine. Nous calculons donc le temps thermique écoulé depuis la date de mi-véraison propre à la placette (Figure 40). Ce changement d'échelle a déplacé les droites de manière horizontale : elles semblent provenir de la même origine à $SRAT = 0$. Cette représentation a donc permis de gommer la variabilité due à la précocité des placettes. Mise à part ça, les droites semblent identiques.

Nous avons deux questions à propos de ces vitesses de maturation :

- est-il plus informatif d'étudier la vitesse en fonction du temps ou du temps thermique ?
- quels facteurs jouent sur la vitesse de maturation, et quelle est leur importance relative ?

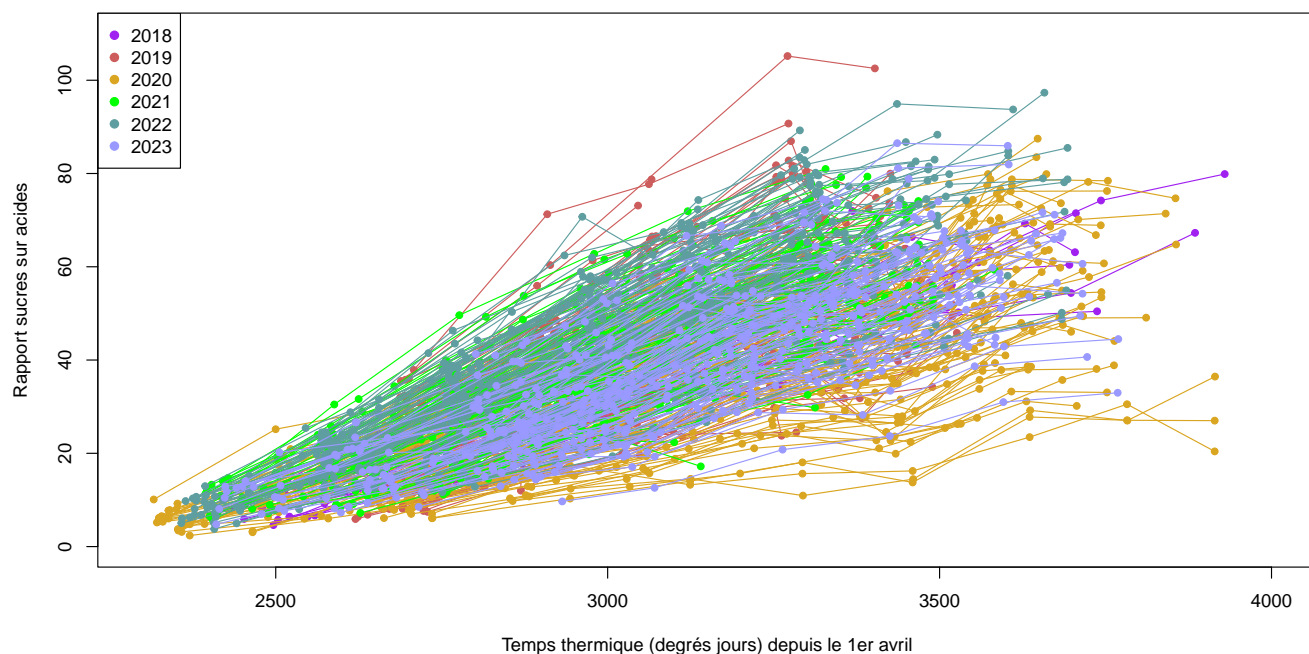


FIGURE 40 – Maturation SRAT en fonction de la somme des températures depuis le 1er avril.

Ces trois vitesses sont représentées dans la Figure 42. Nous remarquons dans un premier temps que la structuration entre millésimes est similaire entre les deux unités : les graphiques en temps ou en temps thermique se ressemblent. En apparence, ce changement d'échelle n'a pas permis de gommer les différences entre millésimes ou entre placettes. D'autre part, le millésime 2020 présente des vitesses de maturation bien plus faibles que les autres millésimes. Ensuite il n'y a pas de différences entre les deux vitesses mesurées en temps thermique, et en réalité nous perdons très peu de placettes lorsque nous calculons la vitesse avec la date de mi-véraison : c'est cette vitesse que nous allons étudier par la suite.

Nous tentons donc d'expliquer les écarts de vitesse de maturation, en utilisant les données de terroir à notre disposition. La méthode de modélisation est celle décrite dans la partie 2 sur l'impact de la topographie sur les températures. Nous modélisons les deux vitesses en fonction des variables centrées-réduites suivantes (en relation simple et en interaction avec *millésime*) :

- la température moyenne post-véraison (modélisée par SVM à partir de 2018)

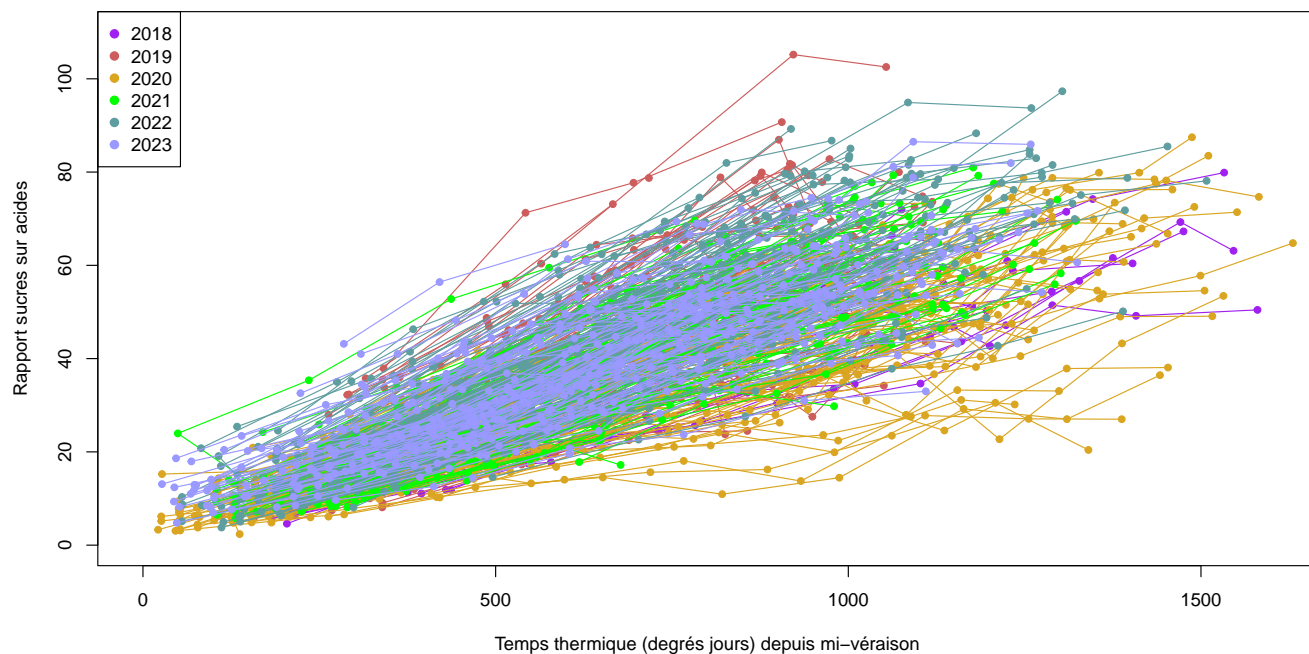


FIGURE 41 – Maturation SRAT en fonction de la somme des températures depuis mi-véraison.

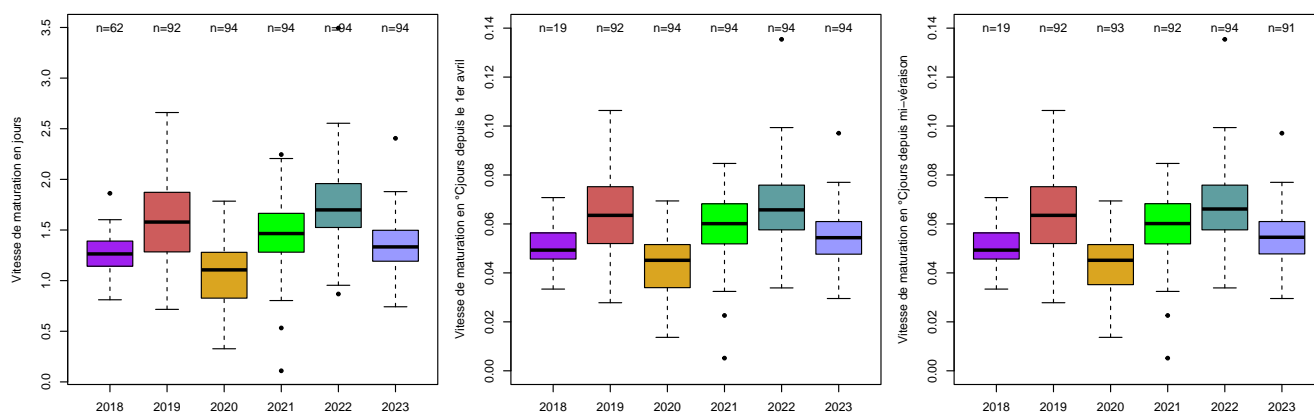


FIGURE 42 – Distributions des vitesses de maturation par millésime, calculées en fonction du temps réel et du temps thermique.

- l’amplitude thermique journalier moyen post-véraison (modélisée par SVM à partir de 2018)
- le poids des baies
- le $\delta^{13}C$
- la teneur en azote assimilable
- la surface externe du couvert végétal

Les effets aléatoires *parcelle* et *millésime* sont inclus dans le modèle sur l’ordonnée à l’origine.

Pour information, un autre modèle avec les températures minimales et maximales a été éprouvé. Il expliquait bien moins de variance (R^2) que le modèle avec la température moyenne et l’amplitude thermique.

TABLE 8 – Résultats de la modélisation des deux vitesses de maturation en fonction des facteurs de terroir : parts de variance expliquée par la température moyenne et l’amplitude thermique moyennes durant la maturation, le poids des baies, le $\delta^{13}C$, l’azote assimilable des baies et de la surface externe du couvert végétal, ainsi que les facteurs non quantifiés de la parcelle et le millésime. La notation ns signifie que le facteur n’impacte pas significativement la variable réponse (probabilité limite de 5%).

	vitesse en temps (/jour)	Vitesse en somme de T° (°C)
Modèle complet		
Moyenne de Y	1.3	0.1
R ² (%)	27.3	27.4
Effets fixes (part R² en %)		
Température moyenne post-véraison	9* (-)	7.9* (-)
Amplitude thermique post-véraison	9.2 (+)	7.2 (+)
Poids des baies	4.2 (+)	4.3 (+)
Delta13C	4.8* (+)	5.8* (+)
Azote assimilable	3.7 (-)	4.2 (-)
SeCV	ns	ns
Effets aléatoires (%)		
part restante parcelle	18.6	19.5
part restante millésime	13.6	14.6
part résiduelle	35.9	36.7

Notes :

* effet significativement différent entre millésimes

Nous voyons sur la table de résultats que la variance expliquée par les deux modèles est égale à 27%. La variance expliquée par la température moyenne est légèrement plus grande pour la vitesse en temps, mais nous nous attendions à ce qu’elle soit plus importante, puisque la température moyenne est déjà prise en compte dans le calcul du temps thermique. Il est d’autant plus étonnant que la relation avec température moyenne est négative : une hausse de température moyenne semblerait ralentir cette vitesse (-0.03 unités DE SR/AT/jour par +1°C en moyenne). Cette relation est dépendante du millésime : l’effet négatif de la température moyenne est surtout présent en 2019 (-0.26 unités/jour par degré supplémentaire) et en 2020 (-0.23 unités/jour par degré supplémentaire). L’amplitude thermique quant à elle est le facteur le plus important et a un effet positif sur la vitesse, de manière stable entre millésimes : plus la parcelle connaît une amplitude thermique journalière élevée, plus la vitesse de maturation est élevée (+0.15 unités/jour par degré d’écart supplémentaire). L’amplitude thermique explique mieux la vitesse en jours que la vitesse en somme de température. Ensuite, le $\delta^{13}C$ explique 4.7% de la variance de la vitesse (en jours), avec +0.06 unités/jour par +1‰ de $\delta^{13}C$ en moyenne, avec une importance plus ou moins forte en fonction du millésime. Les millésimes 2018, 2019 et 2022 connaissent un effet plus marqué de la contrainte hydrique sur la vitesse de maturation que les autres millésimes, et l’effet est quasiment nulle en 2020. Les impacts positifs du poids des baies (+0.14 unités/jour par +1g) et négatifs de l’azote assimilable (-0.01 unités/jour par +10mg/L) sont stables au travers des millésimes.

Outre les 27% de variance expliquée par les facteurs quantifiés, la variance résiduelle propre à la parcelle est responsable de 19% de la variance de la vitesse de maturation : nous pouvons parler d’une variance expliquée

par des pratiques non quantifiées. La variance résiduelle propre au millésime est égale à 14%, mais nous pouvons considérer que la température moyenne post-véraison est aussi caractéristique du millésime. Il reste une part de variance non expliquée par le modèle de 35%, ce qui est important.

Nous voyons que malgré le fait de calculer la vitesse de maturation en temps thermique, nous n'avons pas gagné d'information supplémentaire sur ce qui impacte cette vitesse. Les variables de températures impactent tout autant la vitesse en jours que le modèle en temps thermique, et la vitesse en jours est plus intuitive à interpréter.

3.5 Modélisation du niveau final de maturation

Le niveau final de maturation a été évalué lors d'un contrôle commun dont les dates sont précisées dans la première partie du rapport. Un compromis a été fait pour obtenir la date la plus tardive possible, mais avant que les parcelles les plus précoces soient vendangées.

Nous modélisons les différences de maturité, toutes années confondues, en utilisant les données de terroir à notre disposition. La méthode de modélisation est celle décrite dans la partie 2 sur l'impact de la topographie sur les températures. Chaque paramètre de maturité est expliqué en fonction des variables centrées-réduites suivantes (en relation simple et en interaction avec *millésime*) :

- la température minimale moyenne “post-véraison” (entre le 1er août et le 15 septembre)
- la température maximale moyenne “post-véraison” (entre le 1er août et le 15 septembre)
- le poids des baies
- le $\delta^{13}C$ (déficit hydrique tardif)
- la teneur en azote assimilable
- la surface externe du couvert végétal
- l'indice d'arrêt de croissance des apex estimé à mi-véraison (déficit hydrique précoce)

Les effets aléatoires *parcelle* et *millésime* sont incluses dans le modèle sur l'ordonnée à l'origine. L'effet aléatoire *millésime* englobe la variabilité due au choix de la date de prélèvement (qu'il est impossible d'homogénéiser entre millésimes). Les résultats de variance expliquée sont résumés dans la table ci-dessous.

TABLE 9 – Résultats de la modélisation des paramètres de maturation en fonction des facteurs de terroir : parts de variance expliquée par la température minimale moyenne et la température maximale moyenne durant la maturation, le poids des baies, le $\delta^{13}C$, l'azote assimilable des baies, la surface externe du couvert végétal et de l'arrêt de croissance à mi-véraison, puis les facteurs non quantifiés de la parcelle et le millésime. La notation ns signifie que le facteur n'impacte pas significativement la variable réponse (probabilité limite de 5%).

	SR	AT	AM	pH	SRAT
Modèle complet					
Moyenne de Y	177.1	4.2	2.5	3.4	45.4
R ² (%)	21.5	41.3	46.7	30.5	43
Effets fixes (part R² en %)					
Température minimale post-véraison	ns	0 (+)	ns	15.6* (+)	6.6* (-)
Température maximale post-véraison	ns	10.8 (-)	4.3 (-)	6.9 (+)	17.1 (+)
Poids des baies	10.5* (+)	2.6 (-)	0 (+)	4.3 (+)	7.4* (+)
Delta13C	9.3 (+)	26.3 (-)	24.7 (-)	0.6 (+)	0 (+)
Azote assimilable	7.1* (-)	11 (+)	18.6 (+)	2.1 (+)	13.4 (-)
SeCV	1.7 (-)	ns	ns	ns	ns
IAC à mi-véraison	ns	ns	ns	ns	ns
Effets aléatoires (%)					
part restante parcelle	21.9	22.6	18.2	20.7	21.1
part restante millésime	36.2	7.8	5.3	52	37.2
part résiduelle	37.1	32	28	23.2	29.2

Notes :

* effet significativement différent entre millésimes

3.5.0.1 Sucres : La moyenne de la concentration en sucres dans ce modèle est de 180g/L : il est clair qu'un certain nombre de placettes sont en sous-maturité au moment du prélèvement commun, ce qui est inévitable au vu de la diversité de maturation rencontrée sur le réseau. Le modèle explique 20% de la variance de la concentration en sucres, ce qui est assez faible. Les températures n'impactent pas la concentration en sucres, que ce soit les

températures moyennées sur la saison ou sur la période de maturation. Dans les faits, une interaction significative à été mise en évidence entre le millésime et la température minimale en période de maturation mais cet effet était principalement porté par 2019, avec une relation graphiquement douteuse. L'interaction a été supprimée et l'effet a entièrement disparu : l'effet n'était donc pas généralisable. Le poids des baies est le facteur le plus important : les placettes avec les baies les plus grosses ont plus de sucres (13.68g/L par +1g, effet particulièrement fort en 2020). Ensuite, l'impact du déficit hydrique est important (8% de variance) et stable dans le temps : on estime +4.51g/L par +1‰ $\delta^{13}C$. L'azote assimilable a un impact négatif sur les sucres (-0.74g/L par +10mg/L) mais cet effet est surtout visible en 2020. La surface externe du couvert végétal a un petit effet négatif sur la concentration en sucres (2%).

La part aléatoire due au millésime représente tout de même 36% de la variabilité des sucres. Nous pouvons donc noter une sensibilité très forte de la concentration en sucres au millésime, et cet effet ne semble pas s'expliquer par les températures. 22.5% de la concentration est propre à des facteurs parcellaires. Il reste 38% de variance non expliquée par le modèle.

3.5.0.2 Acidité totale : Le modèle expliquant l'acidité totale est expliqué à 38% par le modèle décrit. Le facteur ayant le plus grand impact sur les acidités est le déficit hydrique avec 24% de la variance expliquée : une unité supplémentaire de $\delta^{13}C$ cause une réduction de 0.25g d' H_2SO_4 /L. Ensuite, des températures maximales trop élevées réduisent la quantité finale des acides (-0.28g/L par °C supplémentaire), et une bonne nutrition azotée permet de les augmenter (0.03g/L par +10mg/L supplémentaire). Les effets des facteurs du terroir sont stables : ils ne dépendent pas de l'année. De surcroît, la variabilité non expliquée due au millésime est aussi faible (7%). Il reste une part importante propre à la parcelle (24%), qui résume la variabilité due au sol, au matériel végétal et aux pratiques de culture ; il reste toutefois 33% de variance résiduelle difficilement explicables.

3.5.0.3 Acidité malique : La part de variance expliquée pour l'acide malique est proche de celle expliquée pour l'acidité totale ($R^2 = 39\%$). Nous retrouvons à nouveau un effet fort du déficit hydrique (-0.29g/L par +1 $\delta^{13}C$), un effet un peu plus important de la nutrition azotée (0.04g/L par +10mg/L supplémentaire) et un effet un peu moindre de la température maximale qui réduit la concentration en acide malique (-0.29g/L par °C supplémentaire).

3.5.0.4 pH : Le modèle expliquant le pH explique 30% sa variance expliquée. Nous avons un impact important des deux températures et du déficit hydrique. Le modèle estime un effet global de + 0.03 par degré supplémentaire de température minimale (globalement) et 0.003 par degré supplémentaire de température maximale. L'impact positif des températures minimales est fort en 2019 (+0.1/°C) et en 2023 (+0.07/°C). L'influence du poids des baies est égal à +0.12 par g en moyenne. L'impact du déficit hydrique est quant à lui constant avec une hausse de 0.03 en pH par +1‰ $\delta^{13}C$. L'influence du millésime sur le niveau du pH est fort (56% de la variance expliquée), et l'effet de la température maximale rentre dans la variabilité inter-millésimes : le pH en 2022 est bien plus élevé que pour les autres millésimes, suivi de près 2019. La variabilité non expliquée due à la parcelle (24%) est aussi élevée.

3.5.0.5 Rapport sucre sur acides : Le modèle linéaire explique 40% de la variance du rapport SR/AT. Le premier facteur influant significativement ce ratio est la température maximale avec +4.02 par +1°C. Ensuite le poids des baies a une influence positive sur le rapport SR/AT (+4.31) et notamment en 2020. L'azote a un léger effet négatif sur l'indice de maturation. L'impact du $\delta^{13}C$ est très faible (<0.1%) et en réalité nous constatons une colinéarité entre la température maximale et le déficit hydrique dans les données, ce qui explique que la part de variance propre au $\delta^{13}C$ sont quasiment nulle. L'effet est quantifié à 3.96 par +1‰ $\delta^{13}C$. L'impact de l'azote est stable au cours des millésimes (-0.05g/L par +10mg/L d'azote assimilable supplémentaire). La part du millésime est fort (32%).