



HAL
open science

Modélisation de l'adaptation de la viticulture littorale et insulaire au changement climatique

Jeanne Thibault

► **To cite this version:**

Jeanne Thibault. Modélisation de l'adaptation de la viticulture littorale et insulaire au changement climatique. Géographie. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2023. Français. NNT : 2023BRES0063 . tel-04551509

HAL Id: tel-04551509

<https://theses.hal.science/tel-04551509v1>

Submitted on 18 Apr 2024

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

ECOLE DOCTORALE N° 598
Sciences de la Mer et du Littoral
Spécialité : *Géographie*

Par

Jeanne THIBAUT

Modélisation de l'adaptation de la viticulture littorale et insulaire au changement climatique

Thèse présentée et soutenue à Plouzané, le 1^{er} décembre 2023
Unité de recherche : LETG – UMR 6554 CNRS

Rapporteurs avant soutenance :

Anne RUAS Chercheure, Laboratoire COSYS, Université Gustave Eiffel
Nathalie OLLAT Ingénieure de recherche, UMR 1287 EVGF, INRAE, Université de Bordeaux

Composition du Jury :

Président : Louis BRIGAND Enseignant chercheur émérite, UMR 6554 LETG, Université de Bretagne Occidentale

Examineurs : Anne RUAS Chercheure, Laboratoire COSYS, Université Gustave Eiffel
Nathalie OLLAT Ingénieure de recherche, UMR 1287 EVGF, INRAE, Université de Bordeaux
Valérie BONNARDOT Enseignante chercheure, UMR 6554 LETG, Université Rennes 2

Dir. de thèse : Cyril TISSOT Directeur de recherche CNRS, UMR 6554 LETG, Institut Universitaire Européen de la Mer

Co-dir. de thèse : Hervé QUENOL Directeur de recherche CNRS, UMR 6554 LETG, Université Rennes 2

Invité(s)

Mercedes FOURMENT Professeure d'agronomie, Universidad de la Republica, Uruguay

« On ne va jamais aussi loin que lorsqu'on ne sait pas où l'on va »

Christophe Colomb

REMERCIEMENTS

Certainement la partie la plus plaisante à écrire ~~et à lire pour la plupart~~, les remerciements permettent aussi de prouver que le travail de thèse n'est pas que solitaire. A ce titre, je souhaiterais remercier sincèrement toutes les personnes qui se sont immiscées de manière fortuite ou non, dans *le bonheur et dans les épreuves*, entre ce doctorat et moi. Merci pour les encouragements, les oreilles attentives, les échanges et conseils, les ~~verres, cocktails, bouteilles,~~ cafés partagés et pour tous les autres moments agréables qui ont rythmés ces quelques années.

Par avance, navrée si j'ai oublié vos prénoms, mais ne m'en voulez pas, je viens de rédiger ce manuscrit.

**

Merci à mes directeurs, Cyril Tissot et Hervé Quénot, pour l'encadrement, le suivi sans faille et vos disponibilités à toute heure malgré vos emplois du temps de ministres. Je tenais à vous exprimer toute ma gratitude pour votre bienveillance, vos conseils, vos remarques toujours pertinentes et vos encouragements. Je vous suis très reconnaissante de toutes nos discussions, de toutes les valeurs transmises et de la confiance que vous m'avez accordée. Une mention particulière pour nos terrains avec leurs lots d'imprévus, et un humble merci pour avoir accepté d'ouvrir chaque capteur au cas où... Que ce soit sur un plan professionnel ou personnel, un sincère et grand merci.

Mes remerciements s'adressent à Valérie Bonnardot, Louis Brigand, Mercedes Fourment, Nathalie Ollat et Anne Ruas, d'avoir accepté de participer au jury, et d'évaluer ce travail de thèse.

Merci à Frédéric Audard, Valérie Bonnardot, Damien Leguyarder, Etienne Neethling et Cornelis Van Leeuwen d'avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi individuel. Merci pour les échanges riches et constructifs, les conseils lors des différentes vidéoconférences, des conférences ou dans les couloirs du laboratoire.

Merci à tous les viticulteurs ou passionnés de vignes, rencontrées au cours de cette thèse. Une pensée particulière à Guillaume Hagnier et Loïc Fourure pour m'avoir toujours bien accueillie sur vos parcelles, pour votre temps et tous les échanges que l'on a pu avoir.

**

Merci à chacun des membres du LETG de Brest d'avoir si bien accueilli la letgienne rennaise que j'étais. Merci à tous d'avoir ponctué ces années de bons moments de rires, de conseils en or, d'apéros et de pauses cafés, de discussions et débats plus variés les uns que les autres. Chacun de vous avez aidé à construire mon parcours, d'une manière ou d'une autre. Je tenais à remercier particulièrement Cyril, Julie, Mathias et Laurence : merci pour votre soutien moral, vos différents appuis techniques, pour vos aides précieuses sur le terrain ou encore les conseils déco-bureau. Une pensée à Fred qui a essuyé beaucoup de pleurs et de doutes mais qui arrive toujours à faire voir le positif, à Pauline pour toutes les discussions « en dehors » et les coups de boost, à Isabelle pour les conseils *cousettes* et ton aide administrative (malgré mes oublis récurrents), à Adeline pour les discussions « van life », à Louis pour les conversations îliennes, la découverte de l'île d'Arz et la balade à vélo, à Iwan « finalement attachant » ! Merci à Elisabeth Bondu pour les conversations « de bureau », et pour toute l'aide apportée.

Merci à tou.te.s les doctorant.e.s et ingénieur.e.s du labo, actuel.le.s ou passé.e.s qui ont rendu l'aventure plus douce : Adrien, Aubrée, Aneta, Clément, Clémentine, Eugénie, Julie, Lola, Manuel, Narimane, Roza, Soumia, Thibaud, Zoé, ... J'espère rester votre soleil Télétubbies encore quelques temps ! Une pensée particulière pour ma collègue de ~~galère~~ bureau, Déborah : c'était un plaisir d'avancer ensemble, et pardon pour les conversations parfois lunaires. Mention spéciale à Baptiste qui a été d'une aide très précieuse : je te souhaite une expérience de thèse enrichissante (et beaucoup de courage).

Merci aussi à toute l'équipe rennaise ! Une pensée toute particulière à Valérie et Théo qui ont été d'une aide très précieuse et d'un grand soutien. Théo, le pro R, un grand merci pour tous nos échanges, les baisses de moral à deux et les coups de boost, les cartos et les cafés partagés. Samuel, merci de m'avoir donné le goût pour la télédétection et d'avoir cru en moi. Merci Damien d'avoir transmis avec pédagogie le goût de R, Jean pour les nombreuses discussions toujours enrichissantes ou encore les « bons plans » du coin, Claudie pour ton soutien et toutes tes combines administratives. Merci à tou.te.s les permanent.e.s, doctorant.e.s et ingénieur.e.s d'avoir (ré)accueilli parmi vous ces derniers mois la letgienne brestoise que je suis, et d'avoir supporté le *quatuor infernal* avant la thèse.

**

Cette thèse n'aurait pas été possible sans un entourage en béton. Merci au « *quatuor infernal* » pour tout le chemin parcouru ensemble, mes *copines de master* ! Gwénaël, si la première partie est peut-être un peu due au hasard, je suis extrêmement reconnaissante d'avoir pu compter sur toi dans tous les moments, dans tous les états et à toutes les périodes ; mention spéciale aux terrains hasardeux.

Un immense remerciement à mes proches, qui ont été d'un soutien infaillible et une source inépuisable de motivation. Merci d'avoir soutenu tous mes choix, même quand ils étaient incompréhensibles : je n'irais pas plus loin dans les études que ce doctorat, soyez rassurés. Merci à mes parents, ma sœur, ma famille, ma belle-famille et à mes ami.e.s. Je tenais à vous remercier de votre générosité, de votre soutien infaillible, de votre patience et de tous les bons moments passés avec vous. Merci de m'avoir aménagé un bureau sur un bout de table, dans une chambre, au coin du feu ou entre deux vaches, de m'avoir fait prendre autant de recul (et de week-ends aussi). Merci d'avoir tenté de comprendre, ~~parfois en vain~~, toujours avec bienveillance et humour. A tous, merci pour nos échanges, vos relectures, vos avis et corrections ; vos présences et vos ondes positives m'ont été indispensables.

Et à toi, l'homme de l'ombre et du mystère, merci ! Merci de ta compréhension, de ta patience à toute épreuve, de tes nerfs d'acier et de ton soutien. Merci d'avoir cru en moi quand moi je n'y croyais plus, de m'accompagner à chaque instant dans cette expérience de thèse mais aussi dans tous les moments du quotidien.

**

Et si l'envie vous prend d'aller au-delà de cette page : bon courage pour la suite de la lecture.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

ARVB	Association pour la Reconnaissance des Vins Bretons
AOP	Appellation d'Origine Protégée
AVB	Association pour les Vignerons Bretons
CCM	Classification Climatique Multicritères
CI	Cool night Index
CORDEX	COordinated Regional Downscaling Experiment
DI	Dryness Index
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
ETP	EvapoTranspiration potentielle
GDD	Growing Degree Days
GES	Gaz à Effet de Serre
GFV	Grapevine Flowering Véraison
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GST	Growing Season Temperatures
GSR	Grapevine Sugar Ripeness
HI	Indice de Huglin
HN	Hémisphère Nord
HS	Hémisphère Sud
IGP	Indication Géographique Protégée
IW	Indice de Winkler
MAUP	Modifiable Areal Unit Problem
MAUVE	Modélisation de l'Adaptation sUboptimale des Vignobles Emergents et existants
Mha	Milliers d'hectares
Miohl	Millions d'hectolitres
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm
NIWA	National Institute of Water and Atmospheric Research
NSGA	Non dominated Sorting Genetic Algorithm

NSGA-II	Non dominated Sorted Genetic Algorithm
OIV	Organisation Internationale de la vigne et du Vin
OM	Optimisation Multiobjectifs
OS	Occupation du Sol
PAES	Pareto Archived Evolution Solution
PESA	Pareto Envelop-based Selection Algorithm
POM	Problème d'Optimisation Multiobjectifs
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations
SPEA	Strengt Pareto Evolutionnary Algorithm
SQL	Structured Query Language
SVM	Support Vector Machine
<i>T</i>	Température moyenne
<i>T_n</i>	Température minimale
<i>T_x</i>	Température maximale
VEGA	Verification through Genetic Algorithm
VWI	Vineyard Water Index

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	5
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	8
SOMMAIRE	11
INTRODUCTION GENERALE	13
PARTIE 1. LA VITICULTURE LITTORALE ET INSULAIRE.....	21
CHAPITRE 1 CLIMAT(S) ET CULTURE DE LA VIGNE	23
CHAPITRE 2 LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES VIGNOBLES LITTORAUX ET INSULAIRES	49
CONCLUSION PREMIERE PARTIE	84
PARTIE 2. MODELISATION SPATIALE ET MULTIOBJECTIFS DES VIGNOBLES POTENTIELS	85
CHAPITRE 3 LA MODELISATION MULTIOBJECTIFS.....	87
CHAPITRE 4 MODELISATION DE L'ADAPTATION SUBOPTIMALE DES VIGNOBLES EMERGENTS ET EXISTANTS : LE MODELE MAUVE	109
CONCLUSION DEUXIEME PARTIE	137
PARTIE 3. RESULTATS ET CAS D'APPLICATION	139
CHAPITRE 5 ANALYSE DE L'EVOLUTION SPATIALE DES ZONES VITICOLES SUBOPTIMALES EN NOUVELLE-ZELANDE	141
CHAPITRE 6 ANALYSE DE L'EMERGENCE POTENTIELLE DE ZONES VITICOLES SUBOPTIMALES EN BRETAGNE, FRANCE	165
CHAPITRE 7 ANALYSE DE L'INCERTITUDE DANS LA DEMARCHE D'OPTIMISATION	195
CONCLUSION TROISIEME PARTIE.....	213
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	214
ANNEXES.....	220
BIBLIOGRAPHIE	230
LISTE DES DEFINITIONS.....	252
LISTE DES EQUATIONS	252
LISTE DES FIGURES.....	253
LISTES DES TABLEAUX.....	257
LISTES DES ANNEXES	258
TABLE DES MATIERES	259

INTRODUCTION GENERALE

Selon l'Organisation Internationale de la Vigne et du vin (OIV), en 2022, la superficie des vignobles est estimée à 7,3 millions d'hectares à travers le monde (OIV, 2023). Cette superficie représente la surface totale en vignes, tout usage confondu (raisins de table, raisins secs, jus et vins). Si la superficie semble relativement stable depuis 2017, cette stabilité dissimule des évolutions très hétérogènes en fonction des pays (Tableau 1). Ainsi, en 2022, 50% des surfaces mondiales en vignes sont possédées par 5 pays et 3 pays représentent un peu plus de 50% de la production mondiale de vin (OIV, 2022, 2023).

	Surfaces en vignes				Production de vin			
	2021 (mha)	2022 (mha)	Var. 21- 22 (%)	% monde	2021 (Miohl)	2022 (Miohl)	Var. 21- 22 (%)	% monde
Monde	7364	7280	-0.4	100	261	258	-1	100
Espagne	963	955	-0.8	13.1	35.5	35.7	+1	1.8
France	805	812	+0.8	11.2	37.6	45.6	+21	17.7
Chine	785	785	0	10.8	5.9	4.2	-29	1.6
Italie	718	718	0	9.9	50.2	49.8	-1	19.3
Turquie	419	410	-2.3	5.6	-	-	-	-
Etats-Unis	393	390	-0.8	5.4	24.1	22.4	-7	8.7
Argentine	211	207	-1.9	2.8	12.5	11.5	-8	4.4
Chili	196	196	-0.5	2.7	13.4	12.4	-7	4.8
Portugal	194	193	-0.5	2.7	7.4	6.8	-8	2.6
Roumanie	189	188	-0.3	2.6	4.8	3.9	-19	1.5

Tableau 1 – Représentation des surfaces en vignes et de la production de vin en 2022, pour les dix pays détenant le plus de vignes au monde

Données : OIV, 2022, 2023

Ces variations importantes sont en mettre en regard avec les impacts du changement climatique observés à l'échelle mondiale. Plusieurs études montrent que l'augmentation des températures et les modifications des fréquences et des intensités des événements climatiques extrêmes affectent les régions viticoles du monde entier (Hannah *et al.*, 2013 ; Morales-Castilla *et al.*, 2020 ; van Leeuwen et Darriet, 2016). Lors de la saison végétative 2022, plusieurs événements météorologiques négatifs ont été enregistrés dans l'hémisphère nord ; les vagues de chaleur et les différentes sécheresses ont entraîné une maturation précoce. Toutefois, le faible taux de maladies et les précipitations en fin de saison ont permis de compenser la situation. Des contextes climatiques perturbés (gels printaniers, fortes pluies, sécheresses, etc.) ont été également observés sur la quasi-totalité des pays de l'hémisphère sud, où seuls la Nouvelle-Zélande et le Brésil enregistrent une variation positive (OIV, 2023).

Dans un tel contexte les perspectives du changement climatique représentent un réel enjeu pour l'industrie du vin (Ashenfelter et Storchmann, 2016 ; Keller, 2010 ; Neethling *et al.*, 2019 ; Schultz et Jones, 2010).

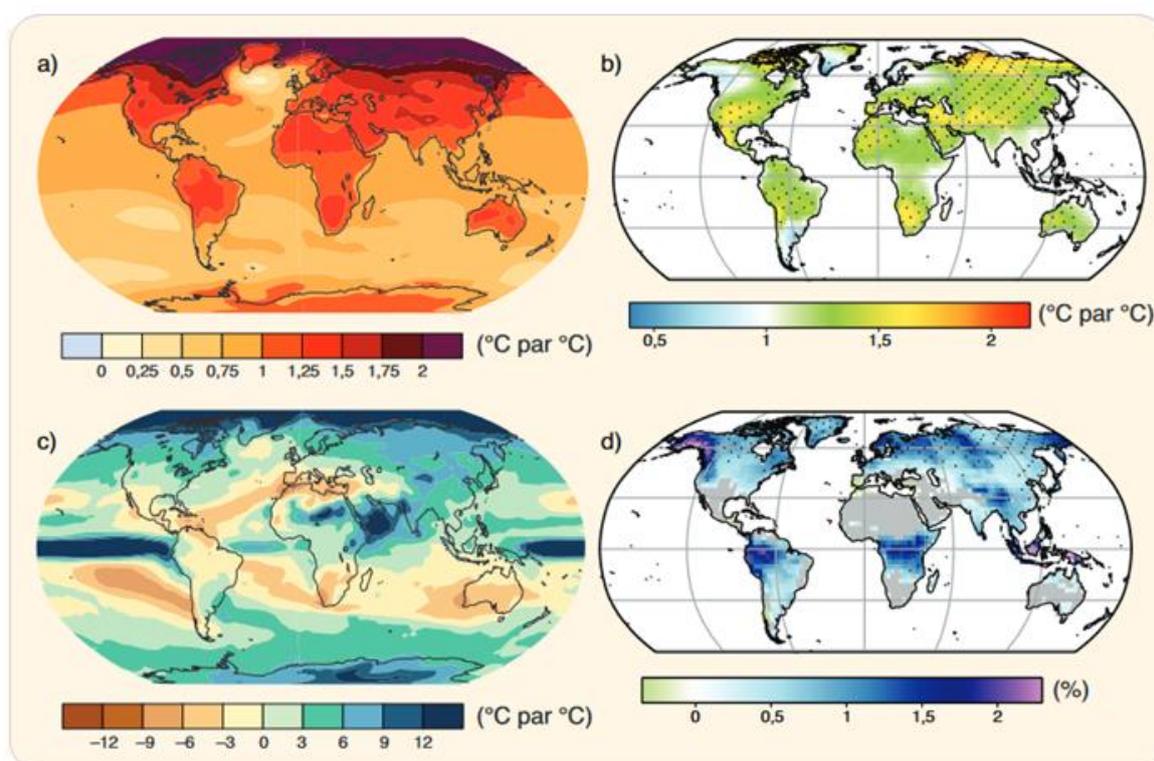


Figure 1 – Evolutions de la moyenne et des extrêmes de températures annuels : a) température moyenne par °C de variation moyenne mondiale entre 1986-2050 et 2081-2100, b) 90^e centile de température journalière maximale par °C de température maximale moyenne mondiale entre 1980-1999 et 2081-2100

Source : IPCC, 2020

Données : Simulations CMIP5, RCP4.

Si jusqu'au début des années 2000, les impacts du changement climatique étaient perçus de façon positive sur la majorité des régions viticoles (meilleures maturations des raisins, fréquences de millésimes de qualité plus importante, etc.) (Fraga *et al.*, 2012a ; Quénol, 2014a ; van Leeuwen *et al.*, 2019), c'est à partir de cette période que la filière viticole a également pris conscience des enjeux. L'augmentation croissante des températures moyennes depuis plusieurs décennies remet en question la culture de la vigne, tant dans ses limites géographiques que dans les pratiques et techniques de productions (Fraga *et al.*, 2013 ; Jones *et al.*, 2005b ; Quénol et Le Roux, 2020 ; Santos *et al.*, 2012, 2020 ; White *et al.*, 2006). Les projections du changement climatique montrent un déplacement des limites géographiques favorables à la viticulture (Figure 2) avec une migration à des latitudes plus élevées (Hannah *et al.*, 2013 ; Quénol et Le Roux, 2020). En Europe par exemple, les vignobles portugais, espagnols ou italiens pourraient être menacés (Fraga *et al.*, 2017 ; Morales-Castilla *et al.*, 2020), tandis que l'Angleterre ou le Pays de Galles bénéficieraient de conditions climatiques plus favorables à la viticulture (Nesbitt *et al.*, 2018).

La projection des zones climatiques favorables à la viticulture (Figure 2), met également en évidence de nombreux espaces littoraux et insulaires. Cette émergence des zones littorales et insulaires est corroborée par l'implantation de nouveaux vignobles littoraux, notamment au Chili, au Royaume-Uni, en Uruguay, en Afrique du Sud, en Nouvelle-Zélande, en France, etc. Ces implantations peuvent se justifier par les particularités climatiques de ces espaces, où les extrêmes climatiques sont moins nombreux en comparaison à des sites plus continentaux (Beltrando *et al.*, 2008 ; Bonnardot *et al.*, 2001 ; Dahech *et al.*, 2012 ; Fourment *et al.*, 2014b). Or, dans un contexte où l'accroissement des températures moyennes semble généralisé, ces spécificités pourraient constituer des avantages majeurs.

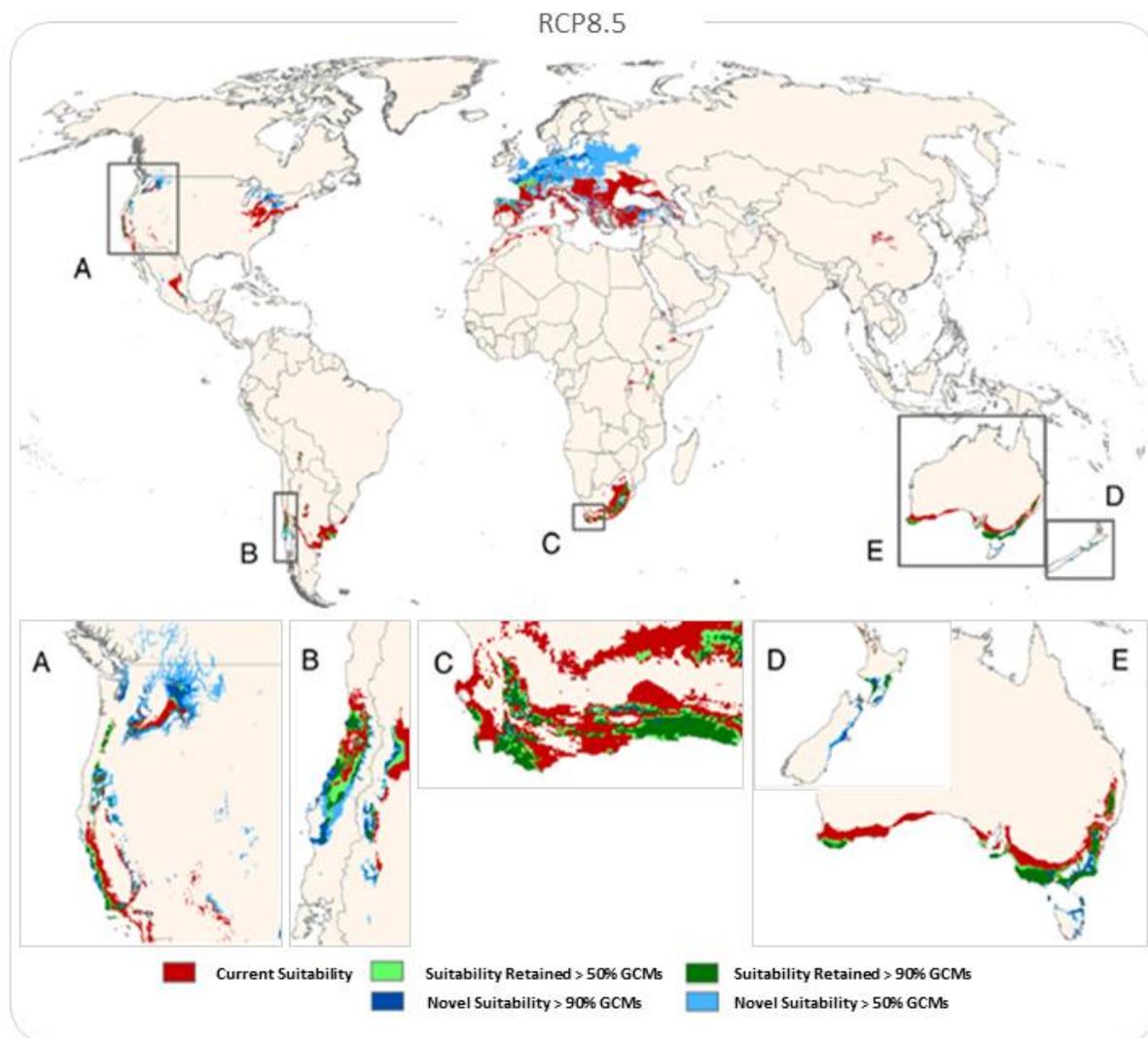


Figure 2 - Changement global de l'aptitude à la viticulture selon le RCP8.5, entre 1961-2000 et 2041-2600

Source : Hannah *et al.*, 2013

Données : ensemble de 17 modèles climatiques globaux, RCP8.5

A court terme, l'un des enjeux pour les vignerons est la conservation de la qualité et du style des vins produits, et à plus long terme, la durabilité et la pérennité des régions viticoles traditionnelles (Fraga *et al.*, 2012b ; Schultz et Jones, 2010). Face à ces enjeux, les viticulteurs reconsidèrent déjà leurs pratiques et leurs stratégies de productions afin de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques (Jones et Webb, 2010 ; Mosedale *et al.*, 2016). En réponse à l'augmentation des températures et aux changements des régimes pluviométriques potentiels, plusieurs mesures d'adaptation peuvent être mises en place aux échelles intra-annuelles (techniques de vinifications, gestion des récoltes), interannuelles (travail du sol, gestion de la

canopée) ou à plus long terme (mode de conduite, changement de porte-greffe et/ou de variétés, irrigation, délocalisation).

Si la mise en œuvre de ces mesures s'inscrit à plusieurs horizons temporels, elle renvoie à différentes visions de l'adaptation. Le projet LACCAVE, initié en 2012, a notamment permis d'identifier 4 stratégies d'adaptation : une stratégie « conservatrice » avec des innovations et relocalisations limitées, une stratégie « nomade » en privilégiant la délocalisation des vignobles en fonction de nouvelles potentialités agroclimatiques, une stratégie « innovante » où l'adaptation se fait par l'intégration d'innovations sans relocalisation majeure du vignoble, et « libérale » où toutes les solutions précédentes sont envisageables (Aigrain *et al.*, 2019 ; FranceAgriMer, 2016d ; Ollat *et al.*, 2021).

Bien que l'adaptation représente un réel défi pour la pérennité de la filière viticole, il convient également de s'interroger sur la durabilité de cette culture. En effet, si plusieurs études mettent en avant les caractères agroclimatiques nécessaires à la culture de la vigne (Hannah *et al.*, 2013 ; Jones *et al.*, 2012b ; Jones et Alves, 2011 ; Tonietto et Carbonneau, 2004), la viticulture est un système d'interactions entre facteurs abiotiques, biotiques et anthropiques (Neethling, 2016). Ainsi, la question de la durabilité de la viticulture doit intégrer non pas uniquement des facteurs climatiques, mais l'ensemble du système agro-socio-éoclimatique (facteurs agronomiques, climatiques, économiques, écologiques, etc.).

En proposant une approche globale permettant d'intégrer des contraintes de diverses natures pour la culture de la vigne (contraintes climatiques, spatiales, environnementales, économiques, sociales, etc.), l'objectif principal de cette thèse porte sur les enjeux et l'identification d'espaces durables pour la viticulture.

Ces enjeux de durabilité sont particulièrement importants dans des espaces soumis à de fortes contraintes, tels que les zones littorales et insulaires. En effet, si les aptitudes climatiques futures des îles et du littoral semblent propices à la viticulture, ces espaces sont soumis à d'importantes contraintes qui soulèvent de nombreuses questions sur les conditions d'extension des zones d'exploitation existantes ou d'implantation de nouveaux vignobles. Les zones côtières concentrent près de 60% de la population mondiale et sont soumises à des pressions multiples et souvent cumulatives (foncières, touristiques, usages antagonistes, dégradations des écosystèmes...). En France métropolitaine, selon l'Observatoire du Littoral, « *les 885 communes littorales accueillent un peu plus de 10% de la population sur seulement 4% du territoire, et ont une [...] capacité d'accueil touristique estimée à 7 millions de lits* ». De même,

le ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires estimait une densité de population de 265 habitants au km² en 2020 sur les communes littorales (hors estuaires), soit une densité moyenne 2,5 fois plus que la moyenne métropolitaine.

Ces constats amènent à se questionner sur la durabilité des zones de production actuelles et à l'émergence de nouvelles zones d'opportunité dans le contexte du changement climatique. En privilégiant les espaces littoraux et insulaires cette thèse aura pour principal objectif de développer une méthodologie de modélisation prospective permettant de simuler la distribution spatiale des zones viticoles suboptimales au regard de différents scénarios du changement climatique. Initiée à différents horizons temporels, cette démarche abordera plusieurs des questions sous-jacentes : les espaces littoraux et insulaires possèdent-ils des caractéristiques agroclimatiques spécifiques susceptibles de constituer un atout pour la viticulture de demain ? Sont-ils des espaces à privilégier dans un contexte de changement climatique ? Quel cadre de modélisation et d'expérimentation permettrait de simuler l'évolution des zones viticoles pertinentes pour différentes projections du changement climatique ?

Afin de répondre à ces différents questionnements, cette thèse s'articule en trois parties.

- La première partie porte sur les principaux déterminants de **la viticulture littorale et insulaire**. Dans un premier temps, les variabilités climatiques ainsi que l'impact et les réponses de la vigne à ces variabilités sont abordés (**CHAPITRE 1**). Les caractéristiques climatiques des espaces littoraux et insulaires sont ensuite exposées, ainsi que différents exemples de configurations de ces vignobles (**CHAPITRE 2**). Ces différents éléments visent à identifier les spécificités de la viticulture littorale et insulaire.
- La seconde partie s'intéresse à la **modélisation spatiale et multiobjectifs des zones viticoles suboptimales**. Dans un contexte de changement climatique et de hausse généralisée des températures, l'une des questions majeures pour la viticulture est l'optimalité des espaces (actuels et futurs) pour la culture de la vigne. En s'appuyant sur le cadre conceptuel de l'optimisation spatiale présenté en **CHAPITRE 3**, le modèle développé au cours de cette thèse est exposé en **CHAPITRE 4**. Baptisé MAUVE, pour Modélisation de l'Adaptation sUboptimale des Vignobles Emergents et existants, ce modèle permet de mettre en avant les espaces adaptés à la culture de la vigne, selon un scénario établi par l'utilisateur.
- Différentes applications du modèle MAUVE sont mises en œuvre dans la troisième partie, intitulée « **Modélisation des potentialités viticoles** ». Les **CHAPITRE 5**

CHAPITRE 6 s'attacheront, respectivement, à la Nouvelle-Zélande en tant que région viticole existante et à la Bretagne en tant que région viticole émergente. Les contextes historiques, viticoles et climatiques de ces régions seront exposés, puis le modèle MAUVE est testé en fonction de différents scénarios. Enfin, le **CHAPITRE 7** aborde la question de l'incertitude dans la démarche de modélisation.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'IRP VINADAPT (International Research Project, High-resolution scenarios for adapting agrosystems to climate change : application to viticulture) portant sur l'adaptation de la viticulture au changement climatique. Ce projet pluridisciplinaire tend à produire des scénarios d'adaptation à différents horizons temporels et pour diverses projections de changement climatique. Les scénarios sont construits en fonction de différentes pratiques viticoles propres aux régions d'applications françaises et néo-zélandaises et dont les objectifs de productions et les impacts de ces changements sont très différents. L'IRP VINADAPT a également permis l'implémentation de différents réseaux de mesures météorologiques. Ces réseaux ont permis de documenter les spécificités climatiques aux échelles locales notamment en Bretagne, et ont permis d'initier la démarche d'optimisation présentée dans cette thèse.

PARTIE 1

LA VITICULTURE LITTORALE ET INSULAIRE

A échelle mondiale, la diversité de climats engendre des configurations viticoles très variées. Si le développement de la vigne est étroitement lié au climat et plus spécifiquement aux températures, les configurations locales sont la résultante de nombreux facteurs comme la variabilité locale du climat, les conditions topographiques et pédologiques, les pratiques agronomiques, l'héritage culturel, les stratégies de production, etc. Afin d'identifier ces différentes configurations et de comprendre les spécificités des principaux vignobles, cette première partie aborde la relation vigne/climat, les savoir-faire locaux et les stratégies de production. Il s'agit également de comprendre s'il existe des spécificités agroclimatiques et socioéconomiques permettant de distinguer les vignobles littoraux et insulaires, des vignobles continentaux.

CHAPITRE 1

Climat(s) et culture de la vigne

Ce premier chapitre permet d'exposer les différentes relations existantes entre le climat et la viticulture. Afin de mieux appréhender ces relations, la première section dresse les limites potentielles des climats viticoles grâce aux isothermes optimales et à différents indicateurs représentatifs du zonage et du potentiel qualitatif viticole. La seconde section met en avant les variabilités spatiales et temporelles du climat ; ces variabilités climatiques sont engendrées par différents phénomènes et facteurs se produisant à diverses échelles, allant du global au local. Enfin, la troisième section présente les différentes réponses de la vigne face au climat, puis expose la place de la viticulture dans un contexte de changement climatique.

SOMMAIRE DE CHAPITRE

1. DELIMITATION DES CLIMATS VITICOLES	24
1.1. LES LIMITES DE LA CULTURE DE LA VIGNE	24
1.2. REPRESENTATION DU ZONAGE VITICOLE, LES INDICES BIOCLIMATIQUES	26
1.3. REPRESENTATIONS ECOCLIMATIQUES ET LES INDICES ECOPHYSIOLOGIQUES	30
2. VARIABILITES CLIMATIQUES ET IMPACTS SUR LA VITICULTURE	32
2.1. DU CLIMAT REGIONAL AU CLIMAT LOCAL, UNE IMBRICATION DE DIFFERENTES ECHELLES	32
2.2. L'INFLUENCE DES FACTEURS LOCAUX SUR LE CLIMAT	34
3. LES REPONSES DE LA VIGNE AU CLIMAT	37
3.1. INFLUENCES DES PARAMETRES CLIMATIQUES SUR LA CROISSANCE DE LA VIGNE ET LA MATURATION DU RAISIN	37
3.1.1. <i>Le rayonnement solaire</i>	39
3.1.2. <i>Les températures</i>	39
3.1.3. <i>Les précipitations</i>	41
3.1.4. <i>Le vent</i>	42
3.2. LA VITICULTURE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	43
4. CONCLUSION DE CHAPITRE	47

1. Délimitation des climats viticoles

1.1. Les limites de la culture de la vigne

La géographie des régions viticoles à échelle mondiale est fortement dépendante des climats favorables à l'obtention d'un vin de qualité (Jones *et al.*, 2012a). Historiquement, la vigne est principalement cultivée dans des zones tempérées aux températures moyennes comprises entre 12°C et 22°C durant la période végétative de la plante, c'est-à-dire entre début mars et fin septembre pour l'hémisphère nord (Jones *et al.*, 2012a ; Jones et Alves, 2011 ; Quénot, 2014a) (Figure 3). Durant cette période, des températures négatives peuvent entraîner des dégâts importants et altérer, partiellement ou totalement, la récolte. Ces isothermes sont généralement situées entre les latitudes de 30° et 50°, dans l'un ou l'autre des hémisphères (Ashenfelter et Storchmann, 2016 ; Burns, 2012 ; Neethling *et al.*, 2019). La vigne est donc cultivée sous des climats très différents autour du globe (Carbonneau et Escudier, 2022 ; van Leeuwen, 2010), allant des climats méditerranéens (Italie, Espagne, Provence, etc.), continentaux (Allemagne, Roumanie, etc.), océaniques (Nouvelle-Zélande, Bordeaux, etc.), aux climats subtropicaux secs (Argentine, etc.) et humides (Uruguay, etc.) (Neethling, 2016 ; Tonietto et Carbonneau, 2004).

Certains auteurs précisent que, pour obtenir des vins de haute qualité, les températures moyennes saisonnières devraient être comprises entre 13°C et 21°C (Jones et Alves, 2011). Les zones dont la température saisonnière moyenne est inférieure à 13°C sont, généralement, réservées aux cultivars à maturité précoce ou aux hybrides (Jones et Alves, 2011). De même, la culture de la vigne est très limitée dans des zones où la température saisonnière moyenne est inférieure à 12°C car la saison de croissance idéale pour la plante est réduite. Dans ces régions, les faibles sommes de températures et d'ensoleillement ne permettent pas d'atteindre une maturité idéale, même pour les cépages les plus précoces (Neethling, 2016).

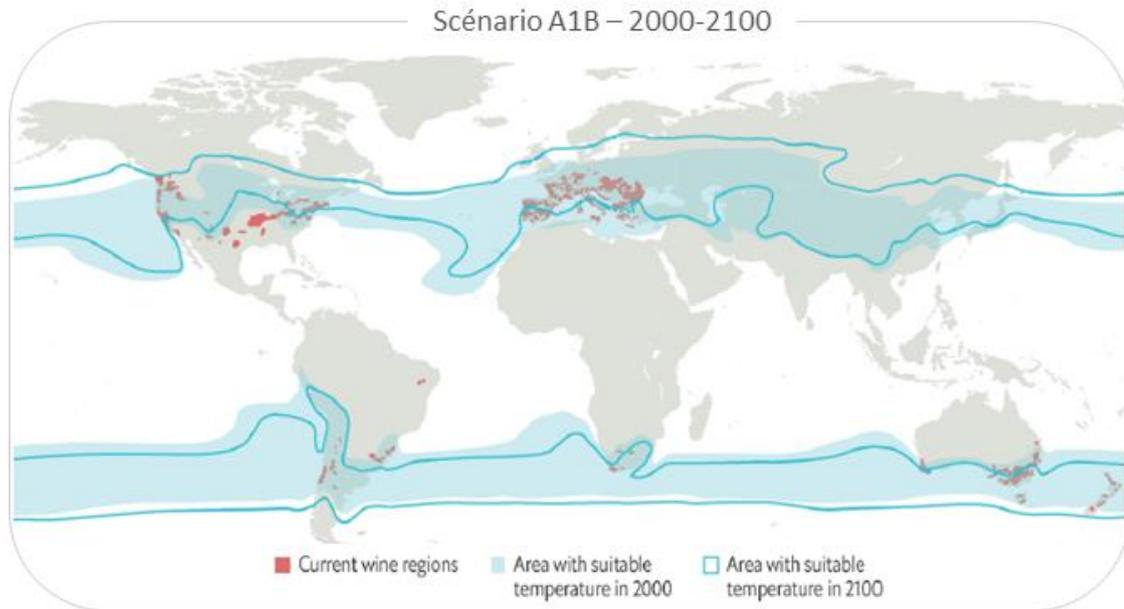


Figure 3 – Evolution des isothermes 12-22°C pour la viticulture entre 2000 et 2100

Source : Vin'îles, 2022 adaptée de Jones et Alves., 2011

Données : National Center for Atmospheric Research's Community Climate System Model (CCSM) pour les données observées (2000) et un scénario A1B (augmentation des émissions de GES jusqu'en 2100)

Cependant, la culture de la vigne est possible en dessous de ces différentes isothermes. En effet, au Canada, dans la région de Québec, des variétés rustiques locales de vignes adaptées à des températures de -30°C sont implantées (Lasserre, 2001 ; Velasco-Graciet et Lasserre, 2006). Afin de lutter contre les températures extrêmes, plusieurs techniques pour protéger les ceps sont mises en place (renchauffage des pieds, enfouissement dans la neige). Ces contraintes climatiques vont également influencer les techniques de vinification. Au Québec, comme en Allemagne ou en Autriche, les récoltes manquent souvent de maturité : la chaptalisation permet de compenser ce manque et de réduire l'acidité du vin (Lasserre, 2001 ; Velasco-Graciet et Lasserre, 2006).

De même, le cas de Lanzarote est une exception aux isothermes idéales de la culture de la vigne, puisque la température saisonnière moyenne y dépasse les 12°C. Avec une forte insolation, de faibles précipitations (150-200 mm/an maximum) (Huetz de Lempis, 2002) et sans possibilité d'irriguer, les viticulteurs pallient la sécheresse et les vents asséchants avec un mode de conduite particulier. Plantés dans des cavités en forme d'entonnoir sur un sol volcanique, les ceps sont conduits en treillis basses. De petits murets en bloc de lave sont construits en arc de cercle autour de chaque cavité. Les cavités permettent à la vigne de bénéficier de la rosée

matinale captée par la roche volcanique. La conduite basse de la vigne ainsi que les murettes constituent des moyens de lutte contre les vents (Huetz de Lemps, 2002 ; Scherrer *et al.*, 2009).

Bien que la viticulture soit possible dans des conditions extrêmes, la surface cultivée ne permet pas de produire de grandes quantités de vin. Pour reprendre les exemples précédents, à Québec, avec une surface en vigne de 612 ha (2016), la production fluctue entre 21 420 hl et 33 660 hl par an, avec une moyenne estimée à 35 hl/ha, et un maximum de 55 hl/ha pour les années exceptionnelles (Lasnier *et al.*, 2016). A Lanzarote, la surface cultivée en vignes représentait 3078 ha en 2007 (Morales, 2011) avec des parcelles moyennes d'un peu plus de 1ha (Huetz de Lemps, 2002). Du fait de l'implantation en entonnoir, les ceps sont très espacés et les rendements demeurent moyens de l'ordre de 5 hl/ha (Huetz de Lemps, 2002)). A titre de comparaison, le seul vignoble bordelais (France) représentait 113 000 ha en 2020, pour un rendement moyen estimé à 50 hl/ha (Rejalot, 2021).

1.2. Représentation du zonage viticole, les indices bioclimatiques

Pour mieux comprendre l'évolution des régions viticoles et dans le but de pouvoir les comparer, plusieurs indices agroclimatiques ont été développés par la communauté scientifique depuis les années 1970. Basés sur le cycle végétatif moyen de la vigne, ces indices bioclimatiques utilisent le principe de degrés-jours de croissance. Les degrés-jours de croissance, communément appelés « Growing Degree Days » (GDD), supposent que la vigne ne se développe qu'une fois un certain cumul de températures atteint. Pour obtenir ce cumul de températures, les différences supérieures à 0 entre les températures journalières moyennes et la température de base, doivent être sommées. En viticulture, la température de base est, généralement, de 10°C (Huglin, 1986 ; Neethling *et al.*, 2011). Cette base est retenue comme le « zéro végétation » pour la croissance de la vigne (Madelin *et al.*, 2010), c'est-à-dire la température minimale à partir de laquelle la vigne peut se développer. Les principaux indices bioclimatiques utilisant ce principe de degrés-jours de croissance sont l'indice de Winkler et l'indice de Huglin.

- A l'origine, l'**indice de Winkler** (IW) permettait de caractériser les vignobles californiens, puis a été étendu à l'ensemble des régions viticoles du monde (Jones *et al.*, 2005b ; Le Roux, 2017). Cet indice se calcule en cumulant les températures journalières moyennes supérieures à 10°C, entre le 1^{er} avril et le 30 septembre dans l'hémisphère nord (HN), et du 1^{er} octobre au 30 avril dans l'hémisphère sud (HS). L'IW permet de

connaître les besoins en chaleur de la vigne en classifiant les régions viticoles en 5 classes différentes (Bonnefooy *et al.*, 2010 ; Huglin, 1986). Ces classes sont fonction des sommes thermiques cumulées sur la période de croissance (Tableau 2).

- Huglin considérant que les températures maximales jouaient un rôle important dans la croissance de la vigne, « améliore » l'IW en les intégrant dans son calcul en 1978 (Huglin, 1986 ; Le Roux, 2017 ; Quénot *et al.*, 2021) (Tableau 2). Ainsi, **l'indice héliothermique d'Huglin (IH)** est une somme des GDD où la température moyenne journalière et la température maximale journalière sont supérieures à 10°C. L'indice se calcule du 1^{er} avril au 30 septembre pour l'HN, et du 1^{er} octobre au 31 mars pour l'HS. Cet indice intègre également un coefficient proportionnel à la durée du jour qui permet de prendre en compte la durée d'ensoleillement moyenne. La valeur de ce coefficient dépend de la latitude de la région concernée (Tonietto et Carbonneau, 2004). Tonietto et Carbonneau fixent la limite thermique inférieure de la culture de la vigne à 1500 GDD (Tonietto et Carbonneau, 2004). En dessous de 1500 GDD, la région est catégorisée comme très fraîche, et seuls des cépages très précoces peuvent atteindre la maturité. Pour des régions à climat « frais » à « tempéré chaud », il est possible de cultiver un large panel de variétés, plus ou moins précoces. A partir de 2400 GDD et plus, le potentiel thermique de la région dépasse les besoins héliothermiques pour la maturité des variétés les plus tardives (Tonietto et Carbonneau, 2004).
- D'autres indices bioclimatiques plus spécifiques ont été développés, comme l'indice de fraîcheur des nuits –ou *Cool night index*– (Tonietto et Carbonneau, 2004) (Tableau 2). En prenant en compte les températures minimales pendant le mois précédent la récolte, le CI permet de classifier les régions viticoles en fonction de la température des nuits. En effet, les températures nocturnes vont influencer les composés aromatiques et les polyphénols des raisins, un mois avant les récoltes (Quénot *et al.*, 2015).

De manière générale, les indices bioclimatiques permettent de catégoriser les différentes régions en mettant en relation le climat moyen d'une région et les conditions climatiques adaptées à la culture de la vigne. D'autres indices bioclimatiques ont été créés afin de traduire l'impact de différentes variables climatiques sur la croissance de la vigne. Ainsi, l'indice de sécheresse –ou *Dryness Index (DI)*– permet de déterminer la disponibilité potentielle de l'eau dans le sol et d'y associer un niveau de sécheresse (Tonietto et Carbonneau, 2004) (Tableau 2). Afin de pallier la difficulté d'obtenir certains paramètres nécessaires au calcul du DI,

Conceição *et al.* (2016) ont proposé une estimation simplifiée de cet indice, dénommé Vineyard Water Index (Tableau 2).

En complément, Tonietto et Carbonneau ont combiné trois indices bioclimatiques afin de créer le Système de Classification Climatique Multicritères Géoviticole (Système CCM Géoviticole) (Tonietto et Carbonneau, 2004). La combinaison de ces 3 indices (le HI, l'indice de fraîcheur des nuits et l'indice de sécheresse) vise à traduire le potentiel d'une région climatique pour la production de raisin de cuve (Bois et Pérard, 2009) et d'identifier des analogues climatiques (Tonietto et Carbonneau, 2004).

Les indices bioclimatiques permettent de définir l'aptitude d'une région viticole, et sont utiles pour comparer une région par rapport à une autre. Cependant, ces indices ne considèrent pas la physiologie de la vigne et sa capacité d'adaptation au climat. L'avancée des stades phénologiques, principale illustration de cette adaptation, est un phénomène déjà observé à l'échelle mondiale (Duchêne et Schneider, 2005 ; Jones *et al.*, 2005a, 2005b ; Leeuwen *et al.*, 2009 ; Seguin et Garcia de Cortazar, 2005 ; van Leeuwen *et al.*, 2019). Les périodes de calcul des différents indices peuvent donc être questionnées dans un contexte de changement climatique. Par exemple, l'indice de fraîcheur des nuits se calcule durant le mois précédent les récoltes, soit septembre pour l'hémisphère nord. Or, avec des vendanges de plus en plus précoces, la fiabilité de cet indice est remise en question (Quénol *et al.*, 2021).

Indices	Période de calcul	Formulation	Classification														
Indice de Winkler (Winkler, 1974)	<ul style="list-style-type: none"> • HN – Du 01/04 au 30/09 • HS – Du 01/10 au 30/04 	$IW = \sum_{01.04}^{31.10} \left(\left(\frac{Tx + Tn}{2} - 10 \right) \right) > 0$	<table border="1"> <tr><td>Trop frais</td><td>IW < 850</td></tr> <tr><td>I</td><td>850 < IW < 1389</td></tr> <tr><td>II</td><td>1398 < IW < 1667</td></tr> <tr><td>III</td><td>1667 < IW < 1944</td></tr> <tr><td>IV</td><td>1944 < IW < 2222</td></tr> <tr><td>V</td><td>2222 < IW < 2700</td></tr> <tr><td>Trop chaud</td><td>IW > 2700</td></tr> </table>	Trop frais	IW < 850	I	850 < IW < 1389	II	1398 < IW < 1667	III	1667 < IW < 1944	IV	1944 < IW < 2222	V	2222 < IW < 2700	Trop chaud	IW > 2700
Trop frais	IW < 850																
I	850 < IW < 1389																
II	1398 < IW < 1667																
III	1667 < IW < 1944																
IV	1944 < IW < 2222																
V	2222 < IW < 2700																
Trop chaud	IW > 2700																
Huglin (Huglin, 1986)	<ul style="list-style-type: none"> • HN – Du 01/04 au 30/09 • HS – Du 01/10 au 30/04 	$HI = \sum_{01.03}^{31.10} \frac{((T - 10) \geq 0) + ((Tx - 10) \geq 0)}{2} k$ <p>où k est le coefficient de latitude</p>	<table border="1"> <tr><td>Très chaud</td><td>IH > 3000</td></tr> <tr><td>Chaud</td><td>2400 < IH < 3000</td></tr> <tr><td>Tempéré chaud</td><td>2100 < IH < 2400</td></tr> <tr><td>Tempéré</td><td>1800 < IH < 2100</td></tr> <tr><td>Frais</td><td>1500 < IH < 1800</td></tr> </table>	Très chaud	IH > 3000	Chaud	2400 < IH < 3000	Tempéré chaud	2100 < IH < 2400	Tempéré	1800 < IH < 2100	Frais	1500 < IH < 1800				
Très chaud	IH > 3000																
Chaud	2400 < IH < 3000																
Tempéré chaud	2100 < IH < 2400																
Tempéré	1800 < IH < 2100																
Frais	1500 < IH < 1800																
Growing Season Temperature (Jones, 2007)	<ul style="list-style-type: none"> • HN – Du 01/04 au 31/10 • HS – Du 01/10 au 30/04 	$GST = \frac{\sum_{01.04}^{31.10} T}{n}$ <p>où n est le nombre de jours de la saison végétative</p>	<table border="1"> <tr><td>Trop frais</td><td>GST < 13°C</td></tr> <tr><td>Frais</td><td>13-15°C</td></tr> <tr><td>Tempéré</td><td>15-17°C</td></tr> <tr><td>Chaud</td><td>17-19°C</td></tr> <tr><td>Très chaud</td><td>19-24°C</td></tr> <tr><td>Trop chaud</td><td>> 24°C</td></tr> </table>	Trop frais	GST < 13°C	Frais	13-15°C	Tempéré	15-17°C	Chaud	17-19°C	Très chaud	19-24°C	Trop chaud	> 24°C		
Trop frais	GST < 13°C																
Frais	13-15°C																
Tempéré	15-17°C																
Chaud	17-19°C																
Très chaud	19-24°C																
Trop chaud	> 24°C																
Cool night Index (Tonietto et Carbonneau, 2004)	Durant le mois précédent la récolte, généralement septembre pour HN, et mars pour HS	$CI = \frac{\sum_{01.09}^{30.09} Tn}{n}$ <p>où n est le nombre de jours du mois précédant la récolte</p>	<table border="1"> <tr><td>Nuits très fraîches</td><td>≤ 12°C</td></tr> <tr><td>Nuits fraîches</td><td>12-14°C</td></tr> <tr><td>Nuits tempérées</td><td>14-18°C</td></tr> <tr><td>Nuits chaudes</td><td>> 18°C</td></tr> </table>	Nuits très fraîches	≤ 12°C	Nuits fraîches	12-14°C	Nuits tempérées	14-18°C	Nuits chaudes	> 18°C						
Nuits très fraîches	≤ 12°C																
Nuits fraîches	12-14°C																
Nuits tempérées	14-18°C																
Nuits chaudes	> 18°C																
Dryness Index (Tonietto et Carbonneau, 2004)	<ul style="list-style-type: none"> • HN – Du 01/04 au 30/09 • HS – Du 01/10 au 30/04 	$DI = \sum_{01.04}^{30.09} (Wo + P - Tv - Es)$ <p>Où Wo est la réserve utile (mm), P les précipitations (mm), Tv l'évaporation potentielle du vignoble (mm) et Es l'évaporation directe du sol (mm)</p>	<table border="1"> <tr><td>Humide</td><td>DI > 150</td></tr> <tr><td>Subhumide</td><td>50 < DI ≤ 150</td></tr> <tr><td>Modérément sec</td><td>-100 < DI ≤ 50</td></tr> <tr><td>Très sec</td><td>DI ≤ -100</td></tr> </table>	Humide	DI > 150	Subhumide	50 < DI ≤ 150	Modérément sec	-100 < DI ≤ 50	Très sec	DI ≤ -100						
Humide	DI > 150																
Subhumide	50 < DI ≤ 150																
Modérément sec	-100 < DI ≤ 50																
Très sec	DI ≤ -100																
Vineyard Water Indicator (Conceição et al., 2016)	<ul style="list-style-type: none"> • HN – Du 01/04 au 30/09 • HS – Du 01/10 au 30/04 	<ul style="list-style-type: none"> • $VWI = P / ETP$ Où P est les précipitations (mm), ETP l'évapotranspiration potentielle (mm) • Estimation du DI $DI = -363.84 VWI^2 + 834.47 VWI - 257.17$ 															

HN : hémisphère nord ; HS : hémisphère sud ; Tx : température maximale, Tn : température minimale ; T : température moyenne

Tableau 2 – Principaux indices bioclimatiques en viticulture

1.3. Représentations écoclimatiques et les indices écophysologiques

Si les indices bioclimatiques montrent leurs limites pour caractériser l'adéquation des cépages aux conditions climatiques futures (Quénol *et al.*, 2021), des indices plus récents issus de la modélisation phénologiques offrent de nouvelles perspectives (Parker *et al.*, 2011, 2013, 2020a). Ces indices, dits écophysologiques, sont plus adaptés pour les simulations futures, puisqu'ils prennent en compte le cycle végétatif de la vigne. Grâce à des données de températures journalières, ces indices permettent d'estimer plusieurs stades phénologiques de la vigne pour différents cépages.

- L'**indice Grapevine Veraison and Flowering (GFV)** a été développé afin de définir les stades de mi-floraison et de mi-véraison (Parker *et al.*, 2011). Cet indice se base sur un échantillonnage de 95 variétés de cépages pour la véraison, et 104 pour la floraison, cultivées sous différentes conditions climatiques (Parker *et al.*, 2011, 2013) (Annexe 1). Ces échantillons ont permis de déterminer des seuils thermiques pour ces deux stades phénologiques. GFV se calcule à partir du 60^{ème} jour de l'année (soit le 1^{er} mars dans l'hémisphère nord), et cumule les températures journalières avec une base de 0°C (Parker *et al.*, 2011, 2013) (Tableau 3). Avec ce modèle, les erreurs d'estimation de dates de floraison et véraison sont inférieures à 1 semaine pour le Sauvignon blanc dans la région de Marlborough (Nouvelle-Zélande) et le Chardonnay dans la région de Bordeaux (France) (Parker *et al.*, 2013, 2020a).
- L'**indice Grapevine Sugar Ripeness (GSR)** permet d'estimer des dates de maturité technique pour différents cépages (Parker *et al.*, 2020a). Ces dates de maturité sont fonction de différents niveaux de teneurs en sucre, allant de 170 g/l jusqu'à 220 g/l (Annexe 2). L'indice se calcule de la même manière que le GFV, sur une base de 0°C, à partir du 90^{ème} jour de l'année (soit le 1^{er} avril pour l'HN) (Parker *et al.*, 2020a) (Tableau 3). Testée sur 95 cépages dans les mêmes conditions que pour le GFV (Sauvignon blanc, Marlborough, Nouvelle-Zélande || Chardonnay, Bordeaux, France), l'erreur d'estimation de maturité de l'indice GSR est d'environ 7 à 10 jours, en fonction des niveaux de maturité retenus (Parker *et al.*, 2020b).

Indices		Période de calcul	Formulation
Grapevine Flowering			
Véraison (Parker <i>et al.</i> , 2011)	GFV	• Du 60 ^{ème} jour de l'année jusqu'au 30/09	$\mathbf{GFV} = \sum_{01.03}^{30.09} \left(\frac{Tn + Tx}{2} \right) > 0$
Grapevine Sugar Ripeness (Parker et al., 2020a)	GSR	• Du 90 ^{ème} jour de l'année jusqu'au 30/09	$\mathbf{GSR} = \sum_{01.04}^{30.09} \left(\frac{Tn + Tx}{2} \right) > 0$

Tx : température maximale, *Tn* : température minimale

Tableau 3 - Indices écophysiologiques en viticulture

2. Variabilités climatiques et impacts sur la viticulture

2.1. Du climat régional au climat local, une imbrication de différentes échelles

Si les indices précédents permettent de donner certaines limites géographiques et phénologiques à la culture de la vigne, il est essentiel de comprendre les différentes imbrications d'échelles spatiales qui vont également influencer la viticulture. En effet, comme expliqué par Neethling, la géographie viticole et la distribution des cépages peuvent s'expliquer à macro échelle (Neethling *et al.*, 2019). A micro échelle, la qualité et la typicité des vins résultent notamment de la diversité des sites et des variabilités climatiques locales.

Comme le souligne Huglin, « *les éléments climatiques [...] ont trait à des territoires plus ou moins vastes et présentent donc des significations variables* » (Huglin, 1986). Les influences climatiques doivent, en ce sens, être considérées à différentes échelles permettant d'appréhender la structuration à multi-niveaux du macroclimat, du mésoclimat, du climat local et du microclimat (Huglin, 1986 ; Jones *et al.*, 2012a ; Neethling *et al.*, 2019 ; Tonietto, 2009) (Figure 4).

Cette imbrication d'échelles spatiales est liée au fonctionnement de l'atmosphère (Quénol *et al.*, 2021). En effet, le niveau supérieur impose les conditions et contraintes aux niveaux inférieurs, dans le principe d'une approche descendante ou *top-down*. De même, plus les échelles spatiales s'affinent, plus les contraintes et les éléments influençant le climat s'ajoutent (Quénol, 2014b ; Quénol *et al.*, 2021 ; Quénol et Bonnardot, 2014). La Figure 4 inspirée de des travaux de Neethling illustre cette imbrication d'échelles (Neethling *et al.*, 2019).

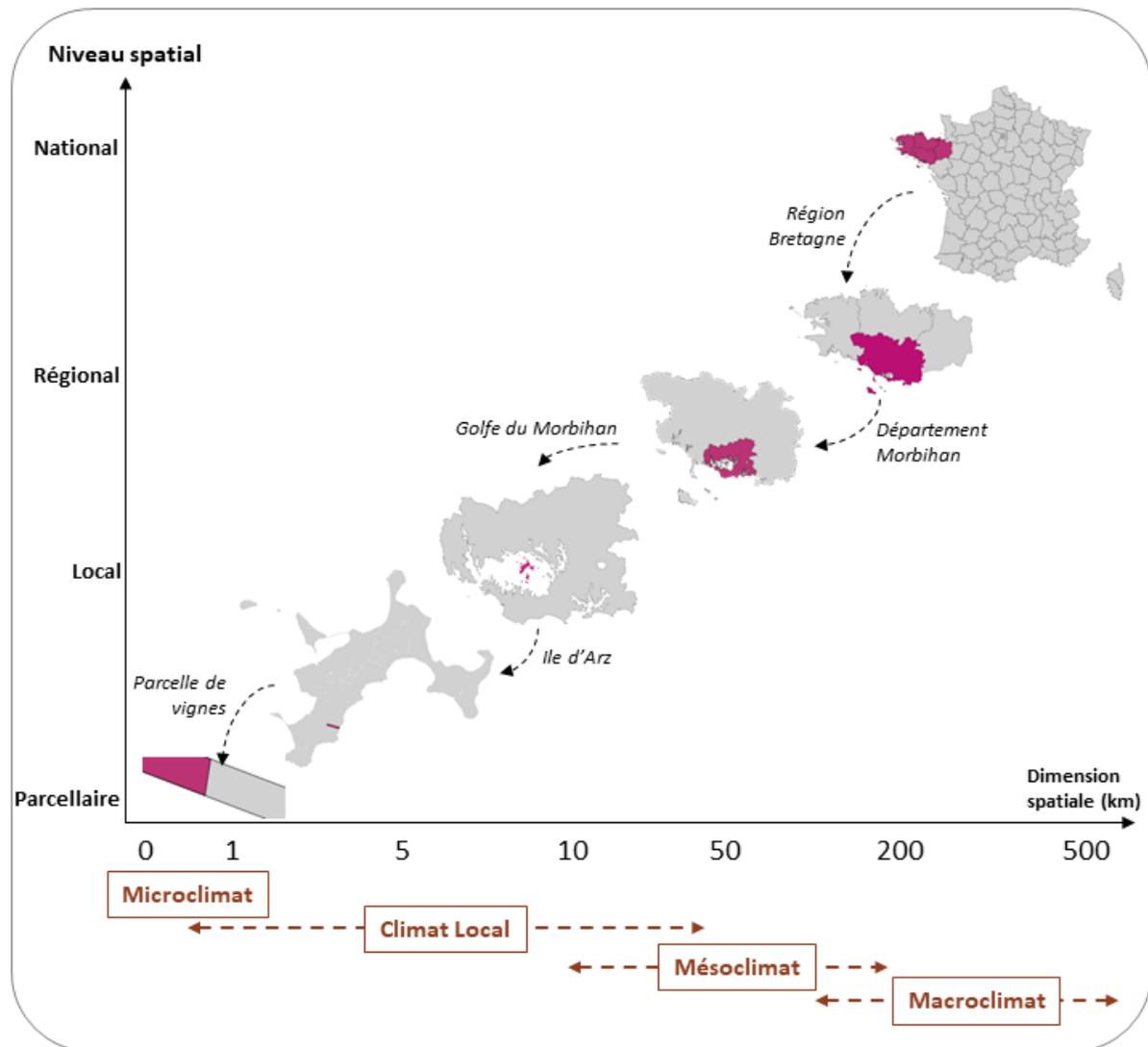


Figure 4 - Imbrication des différentes échelles spatiales en viticulture, appliquée à la parcelle de vignes de l'île d'Arz, dans le Morbihan, France

Adaptée de Neethling *et al.*, 2019

Ainsi, le macroclimat, ou *climat régional*, représente le climat moyen d'un vaste territoire (Huglin, 1986 ; Quénot, 2014b ; Santos *et al.*, 2012), dont la superficie excède les 100 km (Neethling, 2016). A cette échelle et surtout dans les zones où le relief est accentué, les valeurs des données météorologiques n'ont qu'une valeur relative puisqu'elles ne prennent pas en compte les variabilités locales du climat.

Le mésoclimat, ou *topoclimat*, résume les caractéristiques climatiques d'une région comprise entre 10 et 200 km, alors que le climat local représente celui d'un espace plus réduit de l'ordre de 100 m à 50 km (Neethling, 2016). A cette échelle, la modélisation climatique permet de comprendre la variabilité climatique des régions viticoles, en prenant en compte les processus

physiques atmosphériques locaux (Bonnardot et Cautenet, 2009 ; Quénot et Bonnardot, 2014). L'analyse méso-climatique s'attache à mesurer l'influence topographique (pente, altitude) sur différentes variables climatiques (incidences sur le rayonnement solaire, sur la températures, l'exposition aux vents, etc.) (Tachini *et al.*, 2022). Ainsi, Dumas *et al.* décrivent le mésoclimat comme « *le climat issu d'une différenciation spatiale du climat régional, induite par la variabilité du milieu naturel* » (Dumas *et al.*, 1997).

Enfin, le microclimat est le niveau d'échelle climatique le plus fin, et correspond à une surface géographique très réduite de l'ordre d'une dizaine de mètres. Plus fin que l'échelle locale, le microclimat prend en compte les caractéristiques du sol et les différentes pratiques culturales (orientations des rangs, tailles, etc.) (Loussert, 2017).

2.2. L'influence des facteurs locaux sur le climat

Bien que le climat local soit régi par des processus climatiques globaux et régionaux, c'est à cette échelle que l'on apprécie le plus de facteurs influençant la composition des raisins (Neethling *et al.*, 2011). En effet, en prenant en compte les caractéristiques locales (topographie, proximité de corps d'eau, etc.), le climat local permet d'expliquer la répartition géographique des vignobles ou leurs typicités (Bonnefoy *et al.*, 2009 ; de Rességuier *et al.*, 2020 ; Neethling *et al.*, 2011, 2012 ; Quénot, 2014b ; Quénot *et al.*, 2017 ; Quénot et Bonnardot, 2014 ; van Leeuwen, 2010).

Ainsi des variables topographiques telles que l'altitude, la pente, l'orientation ou encore la latitude et la longitude vont influencer les paramètres climatiques. Pour l'altitude, une perte de 0.6°C est estimée tous les 100m (Dumas *et al.*, 1997 ; Jones et Hellman, 2003). En ce sens, l'altitude constitue un avantage non négligeable pour des vignobles dont les températures sont en augmentation : ils bénéficient de températures plus fraîches que des vignobles situés à des altitudes inférieures (de Rességuier *et al.*, 2017) et le cycle végétatif est plus tardif (Rosier, 2020). Ces vignobles profitent également d'une maturation plus lente et d'une insolation plus importante (Neethling, 2016). Les zones d'altitude pourraient ainsi devenir des espaces de production de vins de grande qualité, puisqu'ils bénéficient d'un climat plus frais dans un contexte d'accroissement des températures (Ollat *et al.*, 2016).

Dans des régions au climat frais, l'orientation et l'inclinaison des pentes sont les facteurs topographiques les plus importants. Effectivement, ils peuvent significativement améliorer le rayonnement lumineux nécessaire aux vignes : avec une pente de 10° orientée sud, un vignoble peut recevoir jusqu'à 25% d'insolation en plus par rapport à un site plat. De Rêseguier *et al.* ont mesuré que les températures minimales augmentent en même temps que le pourcentage de pente et que l'altitude (de Rêseguier *et al.*, 2017). Une meilleure insolation permet à des vignobles à climat frais de bénéficier d'une meilleure maturation des baies (Jones et Hellman, 2003). Cependant, un contexte topographique accidenté peut également engendrer des gelées de type radiatives. Le gel radiatif est un phénomène d'écoulement gravitaire dû à une inversion thermique, très nuisible aux vignes en particulier au printemps (QuénoI, 2011). En effet, par nuit claire et avec peu de vent, l'air froid plus lourd et plus dense s'écoule par gravité (Jones et Hellman, 2003 ; Le Roux *et al.*, 2017, p. 201 ; QuénoI, 2011 ; QuénoI *et al.*, 2004). Les températures les plus basses sont alors situées dans des dépressions, ou en amont d'obstacles qui entraînent un blocage d'air froid, et les espaces les plus chauds sont situés à des altitudes plus importantes ; on parle alors d'inversion thermique (Bonnardot *et al.*, 2012 ; Bonnefoy *et al.*, 2013 ; Jones et Hellman, 2003 ; QuénoI, 2011 ; QuénoI *et al.*, 2004). Ainsi, la variabilité spatiale des températures basses est plus importante sur des terrains accidentés, en comparaison à des parcelles en zone plane (QuénoI *et al.*, 2004). Même dans un contexte d'augmentation des températures, le phénomène d'inversion thermique et le risque de gelées radiatives restent présents.

Ce phénomène est moins présent sur les espaces littoraux et insulaires qui se démarquent des zones continentales en comptabilisant moins d'occurrences de gel. Effectivement, la capacité calorifique des continents étant inférieure à celle de l'océan, l'inertie thermique de l'eau permet de limiter les variations de températures extrêmes dans les espaces côtiers et insulaires (Bonnardot *et al.*, 2001, 2005 ; Fourment *et al.*, 2014b ; Planchon, 1994, 1997, 1998). Cette résistance aux variabilités thermiques a des incidences sur les températures minimales, les épisodes gélifs, mais également les épisodes de fortes chaleurs. En ce sens, les Tableau 4 et Tableau 5 illustrent bien cet effet d'inertie thermique. Ainsi, les stations de Belle-ile-en-mer et Sarzeau qui sont les plus proches de l'océan enregistrent toujours les températures minimales les plus élevées, ainsi que les températures maximales les plus basses.

Dist. à l'océan (km)	Belle-ile- en-mer	Sarzeau	Arzal	Vannes- Sené	Bignan	Ploermel
	0.09	2	5	10	40	50
Janvier	6.4	4.5	3.5	3.7	3.5	3.3
Février	5.9	4.4	3.2	3.5	3.2	3
Mars	7.1	5.8	4.9	4.8	4.9	4.3
Avril	8.5	7.3	6.5	6.6	6.5	5.5
Mai	11.2	10.2	9.7	9.7	9.7	8.6
Juin	13.7	12.9	12.3	12.6	12.3	11.4
Juillet	15.4	14.5	13.9	14.2	13.9	13.1
Août	15.6	14.5	13.9	13.7	13.9	13
Septembre	14	12.6	11.6	11.5	11.6	10.7
Octobre	12.3	10.8	9.5	9.7	9.5	8.9
Novembre	9.4	7.4	5.9	3.2	5.9	5.7
Décembre	7.2	5.1	3.8	4.1	3.8	3.6

Tableau 4 - Températures minimales moyennes mensuelles (°C) entre 1991 et 2020

Données MétéoFrance

Dist. à l'océan (km)	Belle-ile- en-mer	Sarzeau	Arzal	Vannes- Sené	Bignan	Ploermel
	0.09	2	5	10	40	50
Janvier	10	10	9.4	9.9	9.1	9
Février	10	10	10.3	10.7	9.9	10
Mars	11.8	11.8	13	13.3	12.4	12.7
Avril	13.9	13.9	15.6	16.1	15.4	15.5
Mai	16.8	16.8	18.8	18.9	18.5	18.8
Juin	19.5	19.5	21.8	22.1	21.5	21.9
Juillet	21.3	21.3	23.6	23.9	23.5	24.2
Août	21.6	21.6	23.7	23.6	23.4	24.3
Septembre	19.9	19.9	21.4	21.9	21.3	21.5
Octobre	16.5	16.5	17.1	17.5	16.7	16.8
Novembre	13.3	13.3	12.9	13.3	12.4	12.4
Décembre	11	11	10	10.5	9.6	9.5

Tableau 5 - Températures maximales moyennes mensuelles (°C) entre 1991 et 2020

Données MétéoFrance

3. Les réponses de la vigne au climat

3.1. Influences des paramètres climatiques sur la croissance de la vigne et la maturation du raisin

Si le climat influence le type d'activité agricole dans l'espace, il agit également dans le temps en régulant la productivité (Neethling, 2016). De fait, le climat a une influence majeure et directe sur la durabilité économique agricole. En viticulture, plusieurs études ont démontré l'importance du climat tant sur la vigne (phénologie, rendement, composition des raisins, etc.) (Garcia de Cortazar-Atauri *et al.*, 2005 ; Huglin, 1986 ; Keller, 2010 ; Santos *et al.*, 2012 ; Vasconcelos *et al.*, 2009) que sur la qualité du vin (Fraga *et al.*, 2014 ; Makra *et al.*, 2009 ; Tonietto et Carbonneau, 2004 ; van Leeuwen et Seguin, 2006). En ce sens, le climat a des répercussions considérables sur l'économie des régions viticoles (Ashenfelter et Storchmann, 2016). Dans le but d'anticiper les impacts du changement climatique, il est nécessaire d'identifier les principaux facteurs agissant sur le développement de la vigne (Figure 5).

		DEVELOPPEMENT DE LA VEGETATION				DEVELOPPEMENT DES BAIES				DORMANCE			
		Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.
		Débourrement			Floraison		Croissance baies		Maturation/Maturité		Chute feuilles		Dormance totale
Températures	Influence négative	Tmin < -2.5 °C		Période prolongée où Tmax < 10°C		Froid exceptionnel		Stress thermique où Tmax > 35°C				Tmin < -5°C et > -20°C endommage les bourgeons latents	
	Influence positive	Tm > 10°C favorise la croissance				Accumulation de chaleur suffisante pour la croissance des baies		Temp. diurnes appropriées pour synthétiser les tanins et sucres		Refroidissement suffisant pour assurer la mise en dormance			
Insolation	Faible quantité					Nuageux/Frais/Humide – Pas de fleur complète							
	Forte quantité					Favorise la nouaison		Favorise l'accumulation des sucres					
Vents	Influence négative	Peut casser les petites branches, bourgeons, etc.				Dessèche les baies							
Précipitations	Période humide	Retarde la floraison				Favorise les maladies		Dilue les baies		Nécessaires à la recharge en eau des sols			
	Période sèche					Favorise la photosynthèse		Favoriser une maturation et un équilibre optimaux					
	Orages, grêles ou fortes pluies	Peut endommager les jeunes bourgeons, feuilles, fleurs ou baies				Favorise les maladies		Peut endommager les baies, détruire les récoltes		Des événements extrêmes peuvent favoriser l'érosion du sol			
Humidité du sol	Influence positive	Recharge du sol importante pour la croissance de la vigne, en début de saison				Une humidité adéquate réduit le stress thermique							
	Influence négative					Une humidité trop élevée entraîne une croissance végétative trop importante		Une humidité trop élevée limite la maturation et retarde la chute des feuilles					

Figure 5 - Facteurs climatiques et météorologiques influençant le développement et les stades phénologiques de la vigne

Figure adaptée de Jones *et al.*, 2012

3.1.1. Le rayonnement solaire

La vigne est une plante vivace qui alterne entre une phase active, *le cycle végétatif*, s'étalant du printemps à l'automne, et une phase de repos, *la dormance*, durant l'hiver. Le cycle végétatif comprend le développement de la végétation ainsi que le développement des baies (Figure 5). Le rayonnement solaire, ou insolation, fournit de l'énergie à la vigne afin d'assurer sa croissance et la maturation des raisins (Huglin, 1986 ; Jones *et al.*, 2012a). L'insolation est très importante pour maintenir l'activité photosynthétique de la plante au cours de sa croissance, mais surtout entre la floraison et la maturité (Figure 5). En effet, le rayonnement solaire joue un rôle majeur dans l'initiation des inflorescences lors de la floraison (Vasconcelos *et al.*, 2009), et dans la synthèse des composés phénoliques lors de la phase de maturation des baies (Jones *et al.*, 2012a).

3.1.2. Les températures

La température est un facteur important dans l'alternance des différentes phases de croissance de la vigne. Le cycle végétatif commence par la levée de dormance au début du printemps. Cette levée de dormance est notamment déterminée par l'accumulation d'énergie effectuée grâce aux températures hivernales et du début de printemps (Garcia de Cortazar-Atauri *et al.*, 2005). Ensuite, la croissance de la vigne est, en grande partie, déterminée par les températures (Jones *et al.*, 2012a ; Keller, 2010). Au cours du cycle végétatif, la croissance de la vigne commence à partir d'une température limite établie à 10°C (Jones *et al.*, 2012a). Ainsi, l'activité photosynthétique des feuilles de la vigne augmente graduellement à partir de ce « zéro végétation ». Du fait de la diversité du matériel végétal, les optimums thermiques pour la photosynthèse des feuilles de la vigne sont variés (Carbonneau, 1976 ; Huglin, 1986). Selon Huglin, le rendement photosynthétique de la vigne est faible (mais non négligeable) entre 10°C et 15°C (Huglin, 1986). Il augmente ensuite très rapidement, puis se stabilise entre 20 et 25°C. A partir de 30°C, l'activité diminue graduellement et s'arrête à partir de 35°C. La croissance de la plante étant étroitement liée à l'activité photosynthétique, la croissance de la vigne suit de près cette courbe (Downey *et al.*, 2006 ; Keller, 2010). Enfin, pour mettre fin au cycle végétatif et revenir à l'état de dormance, un refroidissement des températures est nécessaire (Jones *et al.*, 2012a).

La maturation est une période essentielle pour la qualité future de la récolte (Madelin *et al.*, 2010). Pendant cette période, la température est une variable déterminante dans la coloration, le développement des arômes, des anthocyanes¹ et des polyphénols² du vin (Tonietto et Carbonneau, 2002). De même, des températures supérieures ou égales à 25°C favorisent une baisse de l'acidité et une accumulation des sucres dans les baies (Santibáñez, 2005 ; van Leeuwen, 2010 ; van Leeuwen et Seguin, 2006). Pour les vins rouges, des températures diurnes comprises entre 20°C et 25°C, combinées à des températures nocturnes comprises entre 15°C et 20°C favorisent la synthèse des anthocyanes (Neethling *et al.*, 2011 ; Tonietto et Carbonneau, 2002). Ainsi, plus les variations de températures diurnes et quotidiennes sont importantes avant la récolte, plus la qualité potentielle du vin sera accrue (Jones *et al.*, 2012a). En revanche, des températures trop élevées ou trop basses sont associées à une coloration plus faible (Tonietto et Carbonneau, 2002). Enfin, les exigences thermiques nécessaires à une bonne maturité sont fortement dépendantes des cépages (van Leeuwen, 2010).

En parallèle des températures moyennes favorables à la croissance de la vigne, des évènements plus ponctuels peuvent nuire à la qualité des baies et à la vigne. En effet, durant l'hiver, des températures inférieures à -15°C, -20°C peuvent provoquer des dommages considérables allant d'un endommagement des bourgeons hivernaux jusqu'à la mort du pied (Dami *et al.*, 2012). De même, au printemps, après le débourrement³, les bourgeons sont particulièrement sensibles au gel (Sgubin *et al.*, 2018 ; Webb *et al.*, 2017). Ces gelées tardives –ou gelées printanières– dont les températures sont inférieures à 0°C, exposent les bourgeons primaires et/ou les jeunes pousses à des dommages (Garcia de Cortazar-Atauri *et al.*, 2005 ; Gavrilescu *et al.*, 2019 ; Petitjean *et al.*, 2022 ; Ramos et Jones, 2018 ; Sgubin *et al.*, 2018). Ces dégâts liés au gel sont d'autant plus importants si les températures sont inférieures à -2.5°C (Poling, 2008 ; van Leeuwen, 2010). La mortalité et les dommages de ces bourgeons retardent la croissance végétative de la vigne, mais affectent également le rendement.

A l'inverse, des températures trop élevées pendant la période de croissance ou de maturation ont des impacts négatifs sur la vigne et les baies. En effet, des températures supérieures à 35°C stoppent l'activité photosynthétique de la plante (Huglin, 1986 ; Keller, 2010 ; Schultz, 2000),

¹ Anthocyanes : colorant d'origine naturelle de couleur rouge ou bleue

² Polyphénol : molécule formée à partir des sucres ; permet de former les tanins et de donner la coloration aux vins

³ Débourrement : stade phénologique de la vigne où les bourgeons éclosent et les premières feuilles se développent. Ce stade marque le début du cycle végétatif de la vigne. **Voir plus en 3.3.1**

entraînent une perte d'anthocyanes (Santibáñez, 2005 ; Tonietto et Carbonneau, 2002) et peuvent échauder et dessécher les baies (Beltrando et Briche, 2010 ; Bonnefoy *et al.*, 2013). Si une succession de jours chauds ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) est bénéfique pour le potentiel de maturation, une période trop prolongée entraîne un stress pour la vigne. Ce stress peut engendrer une véraison⁴ prématurée et avoir un effet négatif sur la maturation des saveurs (Jones *et al.*, 2012a ; Leeuwen et Destrac-Irvine, 2017). En ce sens, la vigne est très sensible aux températures : des épisodes gélifs ou de fortes chaleurs à des stades phénologiques clés peuvent altérer le potentiel qualitatif des raisins.

3.1.3. Les précipitations

Les précipitations sont très variables d'une région viticole à une autre. Selon van Leeuwen, les régions viticoles les plus renommées ont une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000 mm (van Leeuwen, 2010). Cependant, il reste difficile de donner des limites pluviométriques strictes pour caractériser les zones d'aptitudes pour la viticulture (Jones *et al.*, 2012a ; van Leeuwen, 2010). Dans différentes études, Planchon souligne que le cumul pluviométrique est moins important sur la frange immédiate du littoral (Planchon, 1994, 1997). En effet, la rugosité plus importante en intérieur des terres permet la formation de nuages, ce qui augmente le cumul pluviométrique de ces espaces en comparaison à la bordure littorale ou les îles.

Si les précipitations permettent d'assurer la recharge hydrique des sols durant la période hivernale, elles peuvent retarder la floraison si l'apport en eau est trop abondant en début du cycle de croissance de la vigne (Figure 5). Après la véraison et durant la maturation des baies, une importante pluviométrie peut jaunir et augmenter la taille des baies, entraînant une baisse des niveaux de sucre et une dilution des arômes. Cette dilution peut sérieusement affecter la qualité de la récolte (Van Leeuwen *et al.*, 2009). De même, une pluviométrie importante associée à une humidité relative assez élevée entraînent l'apparition des maladies cryptogamiques (Jones *et al.*, 2012a ; van Leeuwen, 2010). Ces maladies, en fonction de leur fréquence, peuvent entraîner des pertes en termes de quantité et de qualité sur les futures récoltes.

⁴ Véraison : stade phénologique de la vigne où un changement de couleur s'opère dans les baies. Ce stade est supposé atteint lorsque 50% des baies ont changé de couleur. Suite à ce stade, on considère que la maturation des baies débute. **Voir plus en 3.3.1**

Bien qu'un minimum de précipitations soit nécessaire au bon développement de la vigne, le stress hydrique est favorable à la production de vin de haute qualité (Huglin, 1986 ; Lazcano *et al.*, 2020 ; van Leeuwen et Seguin, 1994, 2006). En effet, un apport en eau excessif encourage la vigueur de la vigne et peut avoir des effets négatifs sur le plan œnologique (Lazcano *et al.*, 2020 ; van Leeuwen et Seguin, 1994).

3.1.4. Le vent

Le vent peut avoir un effet positif ou négatif sur les maladies de la vigne. En effet, cette variable peut être soit un vecteur des spores des maladies cryptogamiques, soit protéger de ces maladies en asséchant les grappes et la canopée soumises à des épisodes pluvieux ou de l'humidité matinale (Loussert, 2017 ; Neethling, 2016). Si la plante est exposée à des vents forts de façon prolongée, des modifications sur la vigne peuvent être observées : réduction de la taille des rameaux, nombre de grappes moins important ou encore retards de maturité (Neethling, 2016).

A proximité des côtes, les phénomènes de brises de mer permettent, entre autre, une atténuation du réchauffement diurne (Beltrando *et al.*, 2008 ; Bonnardot *et al.*, 2001 ; Dahech *et al.*, 2012 ; Fourment *et al.*, 2014b). Directement en lien avec la discontinuité terre-mer, ces brises peuvent constituer un facteur favorable au développement de la vigne dans les vignobles situés à proximité du littoral. En effet, dans des régions aux températures élevées, la brise engendrée par la proximité de l'océan engendre une baisse conséquente des températures, et de fait, une diminution de la durée et de l'intensité du stress thermique (Bonnardot *et al.*, 2001). Ces brises de mer ont été notamment analysées dans des régions viticoles en Afrique du Sud (Bonnardot *et al.*, 2001, 2002), en Uruguay (Fourment *et al.*, 2017) ou encore en Nouvelle-Zélande (Bonnardot *et al.*, 2011).

3.2. La viticulture face au changement climatique

Publié en août 2021, le 6^e rapport du Groupement Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) souligne une fois de plus, que les changements climatiques observés depuis la seconde moitié du XIX^e siècle sont en grande partie d'origine anthropique (IPCC, 2014, 2022b, 2022a). Le GIEC estime également qu'une augmentation des températures entre 2°C et 6°C est fortement envisageable d'ici la fin du siècle (IPCC, 2014, 2022a). Le dernier rapport en date (février 2022) met en avant une augmentation de 1.5°C d'ici une vingtaine d'années, si des actions fortes et durables de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) ne sont pas rapidement mises en place (IPCC, 2022b, 2022a ; Salas y Mélia, 2022). Sans l'instauration de ces politiques de réduction d'émissions de GES, les évolutions climatiques observées (réchauffement global des températures, acidification des océans, recul des glaciers, etc.) vont se poursuivre (Salas y Mélia, 2022).

La viticulture peut être considérée comme un marqueur direct du changement climatique (Mosedale *et al.*, 2016) et « fait figure de proue dans les études d'impacts et les stratégies d'adaptation au changement climatique » (Morin, 2022). En effet, du fait de son implantation sous différentes régions du globe, un large panel de climats régionaux sont représentés. Ces implantations variées permettent de comprendre l'évolution et les adaptations potentielles du secteur vitivinicole au changement climatique. Enfin, étant une culture pérenne (plusieurs décennies), il est possible de suivre l'impact du climat sur la phénologie de la vigne et sur les caractéristiques du vin à moyen et long termes.

A partir des années 2000, la communauté scientifique a commencé à prendre conscience des enjeux et des impacts du changement climatique sur la filière viticole (Duchêne et Schneider, 2005 ; Jones et Davis, 2000 ; Schultz, 2000 ; Seguin et Garcia de Cortazar, 2005). Les augmentations croissantes des températures moyennes et des valeurs des indices bioclimatiques depuis plusieurs décennies remettent en question la culture de la vigne, tant dans les pratiques et techniques de production que dans les limites géographiques (Fraga *et al.*, 2013 ; Jones *et al.*, 2005b ; Quénot et Le Roux, 2020 ; Santos *et al.*, 2012, 2020 ; White *et al.*, 2006) (Figure 6). Avec une migration des régions viticoles traditionnelles de plusieurs kilomètres en direction des pôles dans les deux hémisphères (Jones, 2007), des nouvelles zones potentiellement favorables à la viticulture émergent. A l'inverse, certaines régions viticoles telles que l'Amérique du Nord ou l'Australie, ont déjà atteint voire dépassé leur optimum thermique pour les cépages actuellement implantés (Quénot et Ollat, 2015). Ainsi, l'adaptation de la filière

vitivinicole à ces évolutions climatiques représente un véritable enjeu à l'échelle mondiale (Ashenfelter et Storchmann, 2016 ; Keller, 2010 ; Neethling *et al.*, 2019).

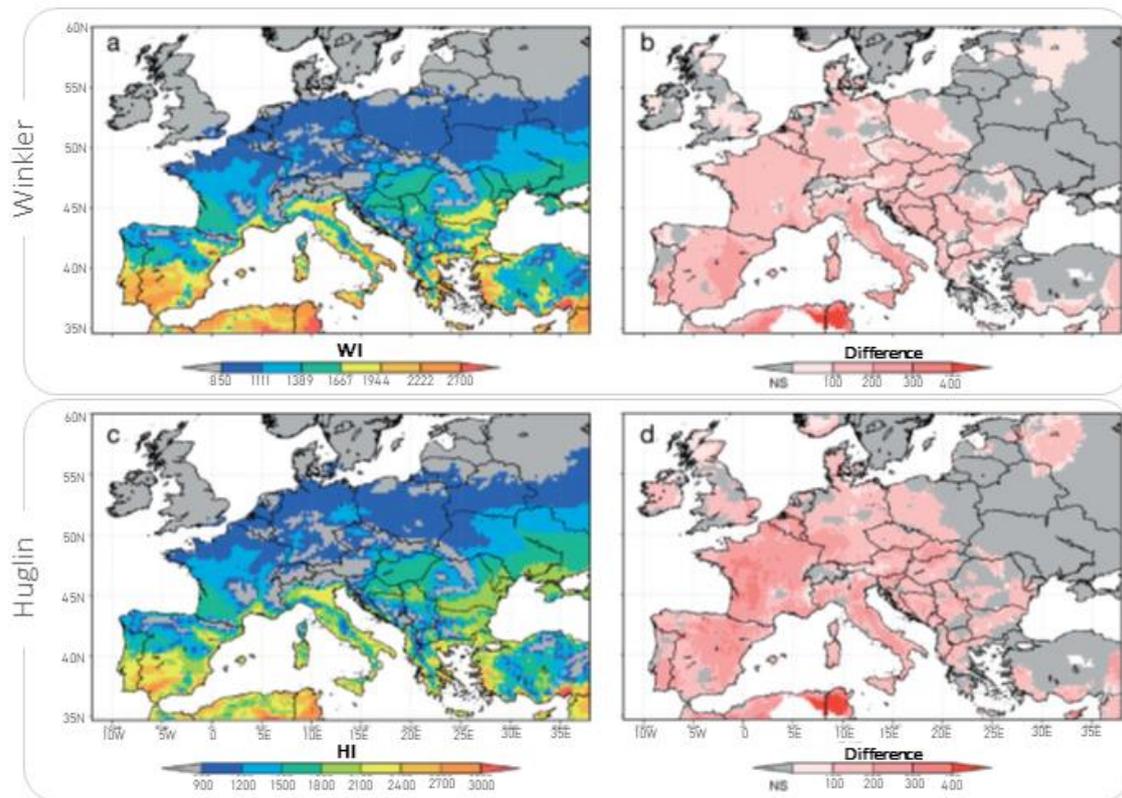


Figure 6 - Indices de Winkler (a) et de Huglin (c) en Europe sur la période 1950-2009, et les différences entre les médianes de 1950-1979 et 1980-2009 pour l'indice de Winkler (b) et Huglin (d)

Source : Santos *et al.*, 2012

Les études du changement climatique et de ses impacts sur la vigne semblent indispensables afin d'anticiper et d'adapter la profession dans les prochaines années. Dès aujourd'hui, et accentués dans les années à venir, l'augmentation des températures et la modification des régimes pluviométriques auront des répercussions sur deux aspects principaux de la production de raisins : la phénologie de la vigne et la disponibilité en eau des sols (ADVICLIM, 2017). Pour préserver la qualité et le style des vins produits, mais aussi maintenir la durabilité économique des régions viticoles à plus long terme, les viticulteurs doivent reconsidérer leurs pratiques et stratégies de production (Fraga *et al.*, 2012b ; Jones et Webb, 2010 ; Leeuwen et Destrac-Irvine, 2017 ; Mosedale *et al.*, 2016).

La physiologie de la vigne semble d'ores et déjà impactée par l'évolution des températures. Des évolutions de la composition des raisins, une baisse des rendements et une précocité accrue entraînent une avancée des dates de vendanges et des stades phénologiques sont notamment

observés dans de nombreuses régions viticoles (Garcia de Cortazar-Atauri *et al.*, 2005 ; Jones *et al.*, 2005a, 2005b ; van Leeuwen *et al.*, 2009, 2019). Selon Duchêne et Schneider, les stades phénologiques les plus marqués par ce décalage précoce sont la floraison et la véraison (Duchêne et Schneider, 2005). Avec la précocité des stades phénologiques, les inflorescences et les bourgeons sont plus exposés aux risques de gelées tardives (Santos *et al.*, 2020). En effet, même si les températures tendent à augmenter, le risque d'épisodes gélifs ne diminue pas forcément (Cantat *et al.*, 2019 ; Gavrilescu *et al.*, 2019 ; Petitjean *et al.*, 2022). De même, une trop grande précocité de maturité peut entraîner de mauvais équilibres aromatiques et dans le rapport sucre/acidité.

Cependant, diverses adaptations peuvent être mises en place par les viticulteurs afin de continuer à produire des vins de qualité, même dans des régions où l'optimum thermique pour la culture de la vigne semble dépassé (Parker *et al.*, 2013). Ces stratégies d'adaptations peuvent être réfléchies à des échelles de temps plus ou moins longues, allant de pratiques intra-annuelles à des solutions planifiées sur plusieurs années (ADVICLIM, 2017). A l'échelle intra-annuelle, il est possible d'agir sur la surface foliaire (taille tardive, écimage, effeuillage tardif, etc.) ou de gérer différemment la récolte et les méthodes de vinification (avancée des dates de récoltes, récoltes aux températures plus basses la nuit, sélection de levures, désalcoolisation, etc.). A l'échelle inter-annuelle, un changement dans la gestion de la canopée peut être envisagée (modification des méthodes de taille et des hauteurs de rognage, changement des modes de conduite). A moyen terme, des systèmes d'ombrage peuvent contribuer à réguler la température du matériel végétal et du sol, et réduire ainsi la contrainte hydrique en diminuant l'évapotranspiration. A plus long terme, le changement de cépages ou l'irrigation peuvent également être envisagés. Cependant, il convient de souligner que ces adaptations sont propres à chaque viticulteur et aux spécificités des vignobles concernés. En effet, les stratégies d'adaptations peuvent être très différentes d'une parcelle à l'autre. Seule la connaissance des configurations locales permet d'identifier des solutions d'adaptations pertinentes à différentes échelles temporelles (ADVICLIM, 2017). La Figure 7 illustre des exemples de stratégies d'adaptations pour une région viticole dont les problématiques seraient relatives à une augmentation importante des températures et à un accroissement du stress hydrique, comme dans la région de Saint-Emilion en France.

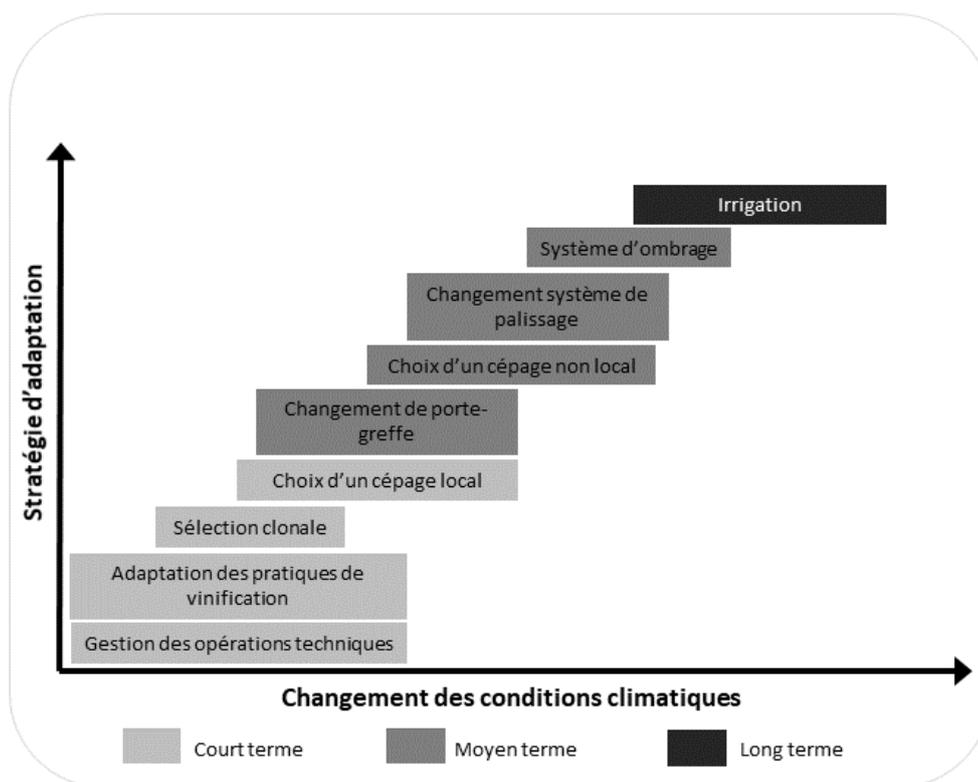


Figure 7 – Exemples de stratégies d'adaptations d'une région viticole face à l'augmentation des températures et l'accroissement du stress hydrique

Source : ADVICLIM, 2017 d'après Nicholas et Durham, 2012

A long terme, outre des adaptations relatives au matériel végétal ou à la gestion du vignoble, une relocalisation des vignobles peut être envisagée (Leeuwen et Destrac-Irvine, 2017). Dans cette perspective, l'identification de sites limitant les extrêmes climatiques revêt un enjeu particulier pour le maintien des régions viticoles traditionnelles ou la mise en exploitation de nouveaux territoires. Les sites situés à des latitudes ou altitudes plus élevées bénéficient de températures moins extrêmes, ce qui constitue un atout non négligeable dans un contexte d'augmentation des températures moyennes. De plus, les configurations locales des sites peuvent également limiter les impacts des températures extrêmes sur la vigne : orientation, pente, proximité d'un corps d'eau, etc.

Dans ce contexte, certains espaces peuvent s'avérer particulièrement intéressants au vu de leurs interactions particulières avec le climat, notamment les îles et le littoral. En effet, du fait de leur proximité immédiate avec de larges surfaces en eau, les espaces littoraux et insulaires tendent à limiter les extrêmes de températures, en comparaison à des sites plus continentaux.

4. Conclusion de chapitre

Si la vigne peut se cultiver sous des conditions très diverses (latitudes, climats, etc.), sa croissance ainsi que la qualité des baies et les styles de vins produits sont très dépendants des variables climatiques, et notamment des températures. Ainsi, plusieurs indices bioclimatiques et écophysiologiques ont été développés afin de suivre l'évolution de la vigne. Ces indices permettent également de traduire l'impact du changement climatique sur le développement de la vigne. Pour autant, les facteurs climatiques doivent être considérés à différentes échelles puisque des contraintes et des mécanismes plus locaux vont affecter le climat. En effet, c'est en prenant en compte les influences locales telles que la topographie ou la proximité de surfaces en eau, que la répartition géographique de vignobles peut s'expliquer (Bonnefoy *et al.*, 2009 ; de Rességuier *et al.*, 2020 ; Neethling *et al.*, 2011, 2012 ; Quénol, 2014b ; Quénol *et al.*, 2017 ; Quénol et Bonnardot, 2014 ; van Leeuwen, 2010).

Aux échelles locales, le rayonnement solaire, le vent et les températures vont également largement influencer le cycle phénologique de la vigne. Dans un contexte d'accroissement des températures, les risques liés aux vagues de chaleur augmentent. L'activité photosynthétique et la croissance de la plante tendent à ralentir voire diminuer (Huglin, 1986 ; Keller, 2010 ; Schultz, 2000). A l'approche de la maturité, les baies peuvent souffrir d'échaudage, ce qui engendre des dégâts sur les récoltes et une baisse des rendements (Bonnefoy, 2013). En parallèle, le cycle phénologique de la vigne tend à devenir plus précoce, ce qui expose les bourgeons et les jeunes pousses à un risque plus accru de gelées printanières qui peuvent remettre en cause la pérennité de certains vignobles. Si des stratégies d'adaptations permettent d'atténuer ou de lutter contre ces changements climatiques, l'adéquation de certains cépages ainsi que la durabilité économique des régions viticoles traditionnelles pourraient être remises en question dans les années à venir.

Avec de telles perspectives, il apparaît pertinent d'identifier des zones de moindres contraintes climatiques. Avec des températures maximales moins importantes et des épisodes gélifs moins fréquents, les zones côtières pourraient s'avérer adaptées aux conditions climatiques futures. Sont-elles pour autant des « *espaces refuges* » pour la culture de la vigne ?

CHAPITRE 2

Les principales caractéristiques des vignobles littoraux et insulaires

Ce deuxième chapitre vise à décrire les particularités des îles et du littoral, et à comprendre en quoi ces espaces sont-ils favorables à la viticulture. Les spécificités climatiques de ces espaces sont exposées dans la première section de ce chapitre. La deuxième section s'intéresse aux différentes configurations et systèmes d'adaptations de la viticulture sur les îles. Enfin, la dernière section de ce chapitre propose une typologie des caractéristiques socio-économiques des vignobles littoraux et insulaires.

SOMMAIRE DE CHAPITRE

1. CARACTERISTIQUES BIOPHYSIQUES DES ESPACES VITICOLES LITTORAUX ET INSULAIRES.....	50
1.1. UN CLIMAT PROPRE AU LITTORAL ET AUX ILES	50
1.1.1. Le régime pluviométrique.....	50
1.1.2. La brise littorale.....	53
1.1.3. Les températures.....	56
2. DIVERSITE DES CONFIGURATIONS AGROCLIMATIQUES DES VIGNOBLES LITTORAUX ET INSULAIRES	58
2.1. LE MODE DE CONDUITE	61
2.2. LE MATERIEL VEGETAL	65
2.3. LE SOL.....	68
3. CONFIGURATIONS SPATIALE ET SOCIO-ECONOMIQUE DES VIGNOBLES LITTORAUX ET INSULAIRES	69
3.1. ÎLES-PAYS, VASTES VIGNOBLES ET PRODUCTIONS INTENSIVES DESTINEES A L'EXPORTATION	71
3.2. VIGNOBLES INSULAIRES ET DE GRANDES RENOMMEES	73
3.3. VIGNOBLES TRADITIONNELS, AVEC MISE EN VALEUR INSULAIRES ET TRANSITION QUALITATIVE.....	76
3.4. VIGNOBLES DE PETITE TAILLE, A COMMERCIALISATION ET RAYONNEMENT A L'ECHELLE INSULAIRE	78
3.5. VIGNOBLES IMPLANTES DANS DE NOUVELLES ZONES D'OPPORTUNITE	80
3.6. PARCELLES DE VIGNE DE PETITES TAILLES ET NON PROFESSIONNELLES.....	82
4. CONCLUSION DE CHAPITRE.....	83

1. Caractéristiques climatiques des espaces viticoles littoraux et insulaires

1.1. Un climat propre au littoral et aux îles

Plusieurs études ont démontré des modifications climatiques à proximité du littoral (Beltrando *et al.*, 2008 ; Bonnardot *et al.*, 2002, 2005, 2011 ; Fourment *et al.*, 2014b ; Planchon, 1997, 1998). Ces modifications (changement de direction de vents, régime pluviométrique modifié, nébulosité, etc.) sont l'expression de mécanismes locaux intervenant à micro échelle. En effet, si les grands domaines climatiques (océanique, continentaux, méditerranéens, etc.) s'observent sur plusieurs centaines de kilomètres dans les terres (Joly *et al.*, 2010), aux échelles locales, le contact terre-mer induit des contrastes thermiques importants.

1.1.1. *Le régime pluviométrique*

Afin de mieux appréhender le rythme pluviométrique des espaces insulaires et côtiers, les régimes pluviométriques de 6 stations de Météo France ont été analysées. L'analyse a été réalisée grâce aux données moyennes mensuelles entre 1991 et 2020 des stations d'Arzal, Belle-île-en-mer, Bignan, Ploermel, Sarzeau et Vannes-Sene. L'ensemble de ces stations sont réparties autour du Golfe du Morbihan, en Bretagne (Figure 8).

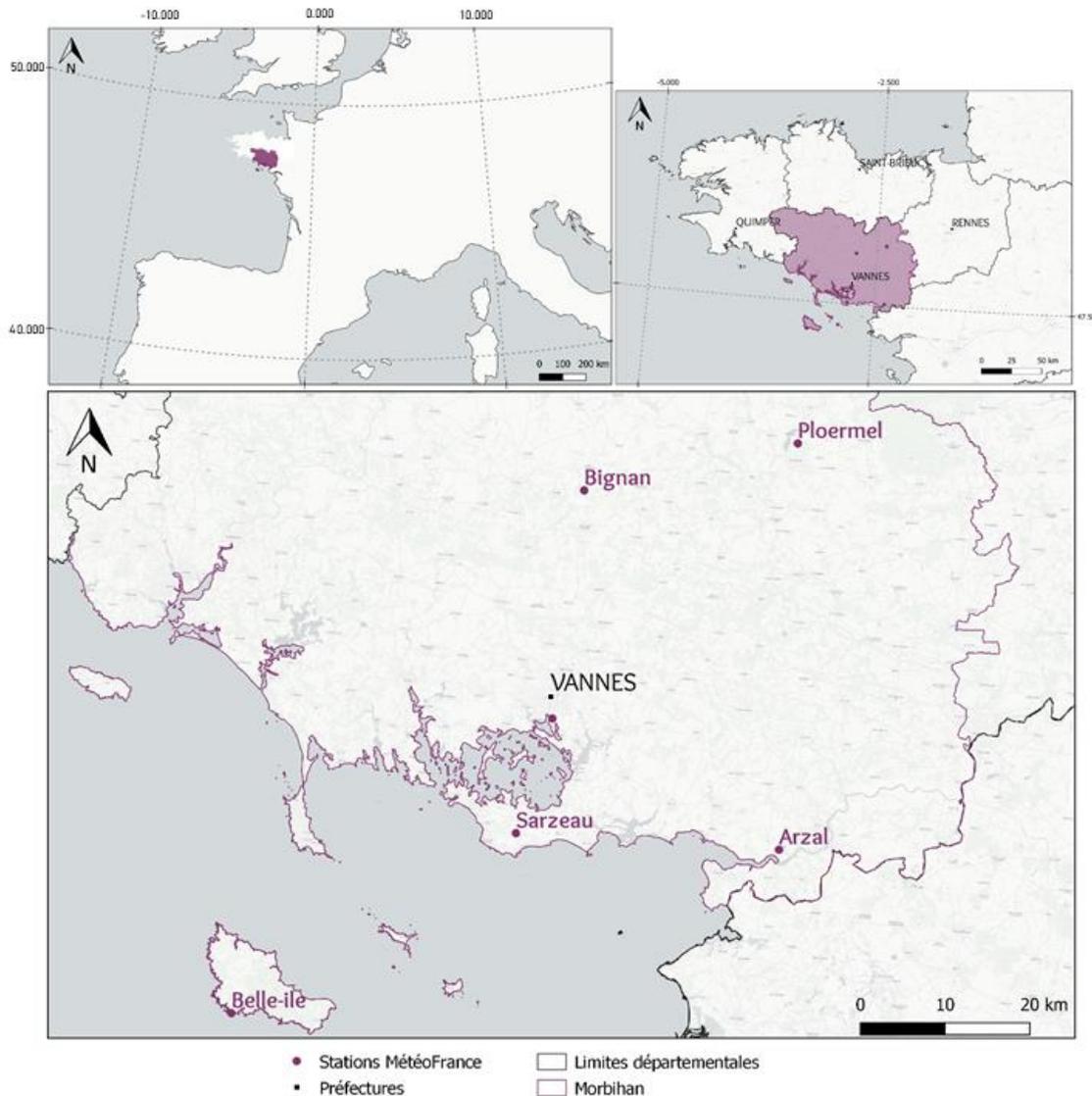


Figure 8 - Localisation des stations MétéoFrance

A proximité des côtes, le rythme pluviométrique annuel est très contrasté avec un maximum hivernal (Planchon, 1998). Le cumul mensuel des précipitations peut alors passer du simple au double entre l'été et l'hiver pour les stations côtières. Ainsi, sur la Figure 9, les régimes pluviométriques de Belle-île-en-mer (Le Talut), Sarzeau, Vannes-Séné ainsi qu'Arzal présentent une nette démarcation entre la saison estivale et la période hivernale, en comparaison aux stations de Bignan et Ploërmel. Ce rapport du simple au double entre l'été et l'hiver, se confirme aussi par la localisation des stations (Figure 9) puisque Bignan et Ploërmel sont les stations les plus éloignées de la bordure littorale.

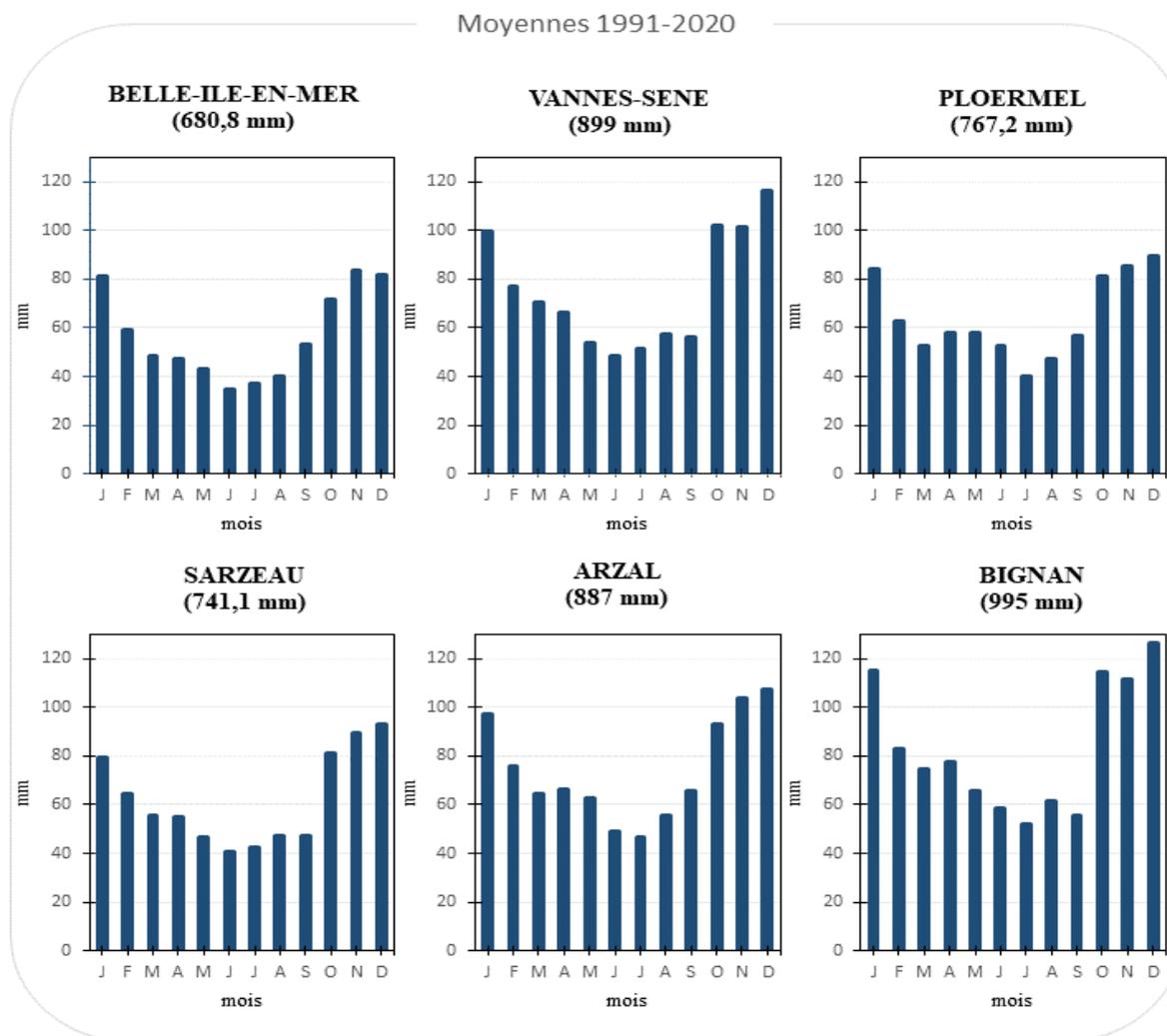


Figure 9 - Régimes pluviométriques moyens dans le Golfe du Morbihan (1991-2020)
Données MétéoFrance

Au sein des stations littorales, le cumul total des précipitations permet encore de différencier les stations. En effet, le cumul de précipitations annuel est plus faible pour les stations situées à proximité immédiate du littoral ou insulaires, des stations situées un peu plus à l'intérieur des terres. Sur la mer, la rugosité quasiment « insignifiante [...] augmente brusquement sur le continent, dont la surface est rigide et hétérogène. A proximité de la côte, la rugosité est encore faible sur les îles et les caps, l'air est peu soulevé, les nuages se forment donc plus à l'intérieur et les stations les plus arrosées sont situées à une certaine distance des côtes. L'accroissement de la pluviosité à quelques distances de la mer forme ainsi le maximum pluviométrique maritime ou dorsale pluviométrique » (Planchon, 1998). Sur la Figure 9, ce cumul permet de distinguer Belle-île-en-mer et Sarzeau dont les précipitations sont, en moyenne, de 680.8 mm et de 741.1 mm, des stations de Vannes-Sené et d'Arzal. En effet, les cumuls pluviométriques

annuels moyens présentent des différences d'au minimum 146 mm (entre Sarzeau et Arzal), soit le cumul moyen pluviométrique de janvier et février pour les stations de Belle-île-en-mer et de Sarzeau.

Cette différence de cumul pluviométrique annuel a également été observé entre Quimper et la pointe de Penmarch, entre 1991 et 2020 (Amiot, 2021). Si les deux stations MétéoFrance sont distantes d'une trentaine de kilomètre, les cumuls moyens mensuels sont deux fois plus faibles à la pointe de Penmarch qu'à Quimper (de 35 à 83 mm mensuels pour Penmarch, contre 62 à 150 mm pour Quimper).

1.1.2. La brise littorale

A échelle locale, la brise littorale est un phénomène météorologique généré par la discontinuité terre-mer, se manifestant par un changement de direction et de vitesse du vent (Beltrando *et al.*, 2008). Les mécanismes de brises littorales sont un type de cellule convective résultant du différentiel thermique de l'air au-dessus de la terre et de la mer. Ainsi, les conditions favorables au développement de la brise de mer sont principalement liées au réchauffement diurne et rapide de la terre, et à la température constante de l'océan dans le même temps (Dahech *et al.*, 2012). Si le vent synoptique est favorable, un gradient thermique de 1 à 3°C entre la surface du continent et la surface de la mer doit être observé afin que le mécanisme de brise de mer se mette en place (Planchon *et al.*, 2004).

En journée, l'air au-dessus du continent s'échauffant plus vite et s'élevant, la pression en surface diminue par rapport à celle observée sur la mer à la même altitude (Figure 10 A, flèche BC). En créant ce gradient de pression horizontal, un mouvement d'air de la mer vers la terre, plus frais et donc plus dense se crée : la brise de mer (Figure 10 A, flèche AB). Ainsi, à altitude égale, la pression est plus forte au-dessus de la terre grâce à l'ascendance de l'air plus chaud que la pression au-dessus de l'océan, ce qui crée une contre-brise (Figure 10 A, flèche CD) (Beltrando *et al.*, 2008 ; Planchon, 1997). Ce courant de retour n'est pas toujours évident à observer, puisqu'il peut être perturbé par la circulation atmosphérique d'échelle spatiale supérieure (Beltrando *et al.*, 2008).

La nuit, le phénomène s'inverse. Du fait de sa grande inertie thermique, l'océan se refroidit moins rapidement que le continent et les circulations sont inversées par rapport à la brise de mer (Beltrando *et al.*, 2008 ; Planchon, 1997). Le vent est alors dirigé de la terre vers la mer : c'est la brise de terre (Figure 10 B, A'B'). L'écart thermique des deux surfaces est moins marqué durant la nuit, c'est pourquoi la brise de terre « a une extension spatiale (horizontale et

verticale) et une intensité généralement plus faibles » (Beltrando *et al.*, 2008). En situation atmosphérique stable, on observe deux renverses⁵ par jour : le matin à la suite de la brise de mer, et le soir avant la brise de terre.

Ainsi, la brise de mer se manifeste par un changement de direction et de vitesse du vent, généralement en fin de matinée. A ces changements, s'ajoute un renforcement de l'humidité et un changement de nébulosité. En effet, la circulation de l'air maritime favorise la formation de nuages stratiformes ou d'un ciel dégagé. De plus, la brise de mer sur le continent provoque une variation des températures et/ou atténue le réchauffement diurne (Beltrando *et al.*, 2008 ; Bonnardot *et al.*, 2001 ; Dahech *et al.*, 2012 ; Fourment *et al.*, 2014b). C'est bien l'apparition de l'ensemble de ces manifestations qui permettent de caractériser la brise de mer. L'importance de la brise de mer étant dépendante du contraste thermique terre-mer, la pénétration dans les terres est très variable d'une région à une autre (Bonnardot *et al.*, 2001 ; Planchon *et al.*, 2004). Le développement de cette brise est également favorisé par des effets d'échelles zonales comme la force de Coriolis, ou des contraintes régionales voire locales comme la topographie.

⁵ Renverse : Changement, cap pour cap, de la direction du vent

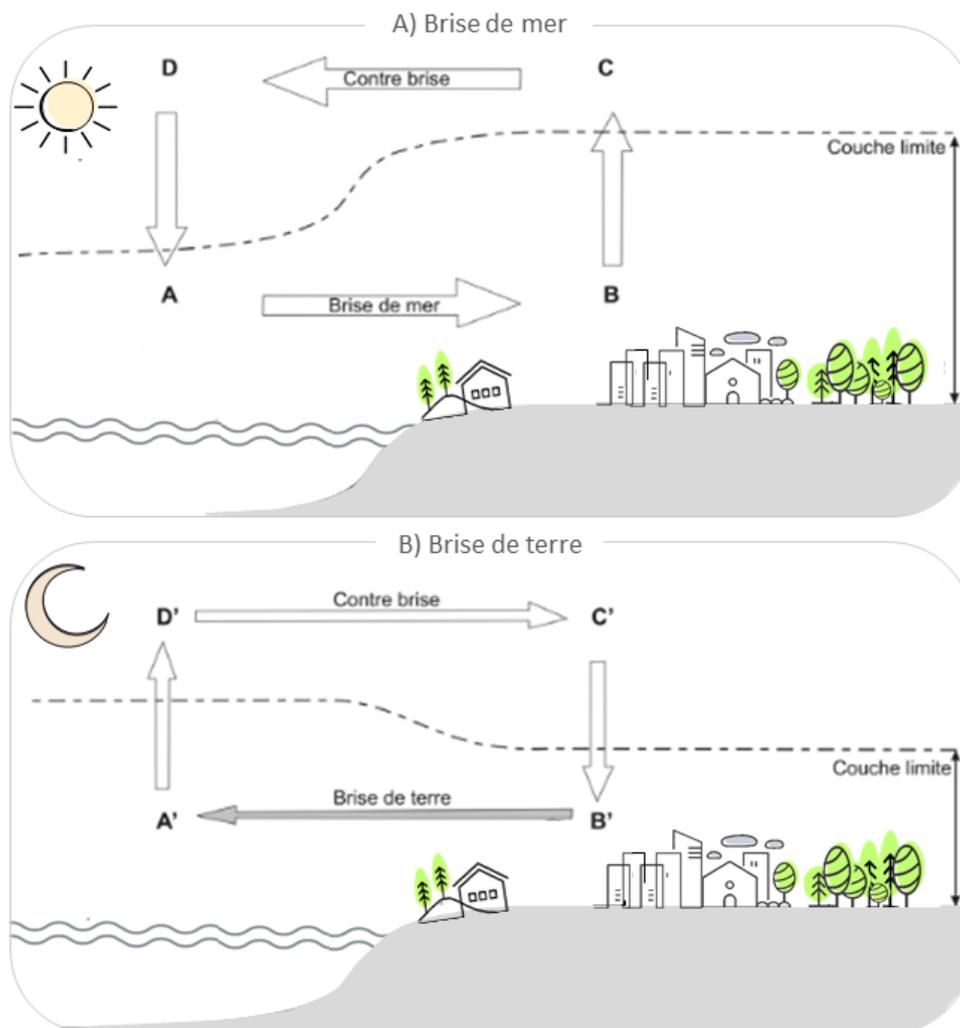


Figure 10 - Circulations de brise de mer (A) et de brise de terre (B)

Adaptée de Beltrando *et al.*, 2014

De manière générale, les brises de mer favorisent donc l'apparition de types de temps propres au littoral, notamment plus frais, plus humides mais également plus ensoleillés en comparaison aux sites intérieurs (Planchon *et al.*, 2004). Si les mécanismes de brise de mer ont de nombreux impacts sur les activités humaines, ils ont également des effets bénéfiques sur les vignobles. En ce sens, différentes études ont mis en avant une atténuation des températures aux heures les plus chaudes de la journée (Bonnardot *et al.*, 2005), une diminution de la durée et de l'intensité du stress thermique sur l'activité photosynthétique des vignes au bénéfice de la composition des raisins (Bonnardot *et al.*, 2001, 2005 ; Fourment *et al.*, 2014a, 2014b) ou encore une diminution des maladies fongiques. En analysant des données de vent, de température et d'humidité relative, Bonnardot *et al.* ont démontré les occurrences de brises de mer durant le mois le plus chaud en Afrique du Sud (Bonnardot *et al.*, 2002). Ces occurrences ont permis d'expliquer les modifications climatiques bénéfiques à la maturation des raisins.

1.1.3. Les températures

La proximité de masse d'eau permet également de limiter les températures extrêmes (Santos *et al.*, 2012), ce qui constitue un atout majeur pour les espaces littoraux et insulaires surtout dans un contexte d'augmentation des températures (Santos *et al.*, 2020). Grâce à des analyses statistiques, Koufos *et al.* ont fait ressortir des particularités climatiques inhérentes aux îles (Koufos *et al.*, 2014). Dans son étude sur les vignobles grecs, les espaces viticoles insulaires se caractérisent par des conditions climatiques plus douces que les espaces continentaux : les températures minimales sont plus élevées et les différences entre les extrêmes journaliers moins importantes que sur les sites intérieurs, durant la saison végétative.

De même, en comparaison à des sites plus éloignés du littoral, les températures minimales sont plus hautes et les jours de gels moins nombreux sur la frange côtière. Une nette diminution des températures minimales est observée sur les premiers kilomètres de la côte vers les terres ; cette diminution est ensuite plus lente. Pour illustrer ce phénomène, les données horaires de 9 stations météorologiques ont été comparées entre le 1^{er} avril 2022 et le 31 octobre 2022 (Tableau 6). Parmi ces stations, trois sont implantées sur des îles et à moins de 1 km de l'océan (Arz, Groix et Belle-ile-en-mer), trois sont à moins de 10 km du littoral (Sarzeau, Theix-Noyal et Muzillac), et les trois autres sont implantées à plus de 40 km du littoral (Paimpont, Guer et Pléchatel).

	Dist. à l'océan (km)	Températures enregistrées		Nombre d'heures enregistrées			
		Min. (°C)	Max. (°C)	≤ 0°C	≤ -1 °C	≥ 30 °C	≥ 35°C
Belle-ile-en-mer	0.5	2.8	34.4	0	0	39	0
Groix	0.1	3.4	37.5	0	0	58	4
Arz	0.3	1.5	37.8	0	0	96	5
Sarzeau	1.5	-1.1	38.9	4	1	128	23
Theix-Noyal	3.0	-3.1	40.4	8	5	128	23
Muzillac	8.0	-2.4	41.3	10	2	143	29
Guer	50	-4.1	40.6	37	21	137	36
Paimpont	57	-4.8	41.6	41	22	159	43
Pléchatel	65	-1.8	39.9	15	6	139	27

Tableau 6 – Données météorologiques horaires du 1^{er} avril 2022 00:00 au 31 octobre 2023 23:00
Données MétéoFrance

A l'exception de l'île d'Arz et de Belle-île-en-mer, toutes les températures négatives maximales ont été enregistrées au cours de la matinée du 04 avril (et le 07 mars pour Arz et Belle-île-en-mer). Les températures minimales ont été enregistrées à 1h pour Sarzeau, 4h pour Theix-Noyal, et 7h pour Muzillac, Guer, Paimpont et Pléchâtel. Ainsi, les stations situées sur les îles n'ont jamais enregistré de températures négatives entre le 1e avril et le 31 octobre 2022. Les occurrences d'heures inférieures ou égales à 0°C sont plus importantes sur les sites les plus continentaux. De même, les données enregistrées montrent également que plus les sites non insulaires sont éloignés du littoral, plus les températures minimales enregistrées sont fraîches, à l'exception de Pléchâtel. La localisation de la station pléchâtelloise, située en amont d'une petite vallée entourée de bâtiments, contrairement aux autres stations toutes situées en plein champ, est un élément d'explication tangible de cette exception.

De la même manière, les sites insulaires comptabilisent le moins d'heures chaudes ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) au cours de la saison, peu d'heures très chaudes ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) et les températures maximales sont moins élevées en comparaison aux autres sites. Même si la différence est moins importante que pour les températures minimales, les occurrences d'heures chaudes sont en relation avec la distance du site par rapport au littoral : plus la distance entre la bordure littorale et le site est importante, plus les occurrences d'heures chaudes sont élevées. A l'exception de Belle-île-en-mer, toutes les températures maximales ont été enregistrées sur la journée du 18 juillet : à 9h pour Sarzeau, 14h pour Theix-Noyal et en fin d'après-midi pour les sites plus continentaux.

De la même manière, Koufos *et al.* ont analysé les températures minimales moyennes de 23 sites viticoles grecs durant la saison végétative entre 1981 et 2010 (Koufos *et al.*, 2018). Les températures minimales moyennes étaient alors de 17.1°C pour les sites insulaires, de 14.7°C pour les sites côtiers et de 12°C pour les sites plus continentaux. Les températures maximales moyennes s'évaluaient de 22.7°C à 27.4°C avec des sites viticoles intérieurs généralement plus chauds que les sites côtiers ou insulaires : la moyenne étant de 25.5°C pour les sites intérieurs contre 24.6°C pour les sites insulaires.

2. Diversité des configurations agroclimatiques des vignobles littoraux et insulaires

Afin d'identifier et de comprendre les particularités des espaces littoraux et insulaires, différents critères ont été mis en avant dans la perspective d'élaborer une typologie (Thibault *et al.*, 2020b, 2020a, 2022). Cette typologie a été créée grâce une revue bibliographie et alimentée par des exemples à échelle mondiale. Elle permet de construire des fiches descriptives des différents vignobles (Figure 11, Annexe 3) et de caractériser des facteurs et variables propres aux espaces littoraux et insulaires. Divisée en trois grandes sections, la première partie fait référence aux caractéristiques biophysiques des vignobles littoraux et insulaires, la deuxième aux caractéristiques agroclimatiques et la dernière est relative aux différentes configurations spatiales et socio-économiques de ces vignobles. Comme précédemment évoqués, les caractéristiques climatiques déterminantes de vignobles littoraux et insulaires sont les températures annuelles, les températures saisonnières, les précipitations et les vents. Bien que ces éléments puissent s'appliquer aux vignobles plus continentaux, le point précédent a permis de déterminer qu'il existait bel et bien des traits spécifiques des climats *maritimes* et *côtiers*.

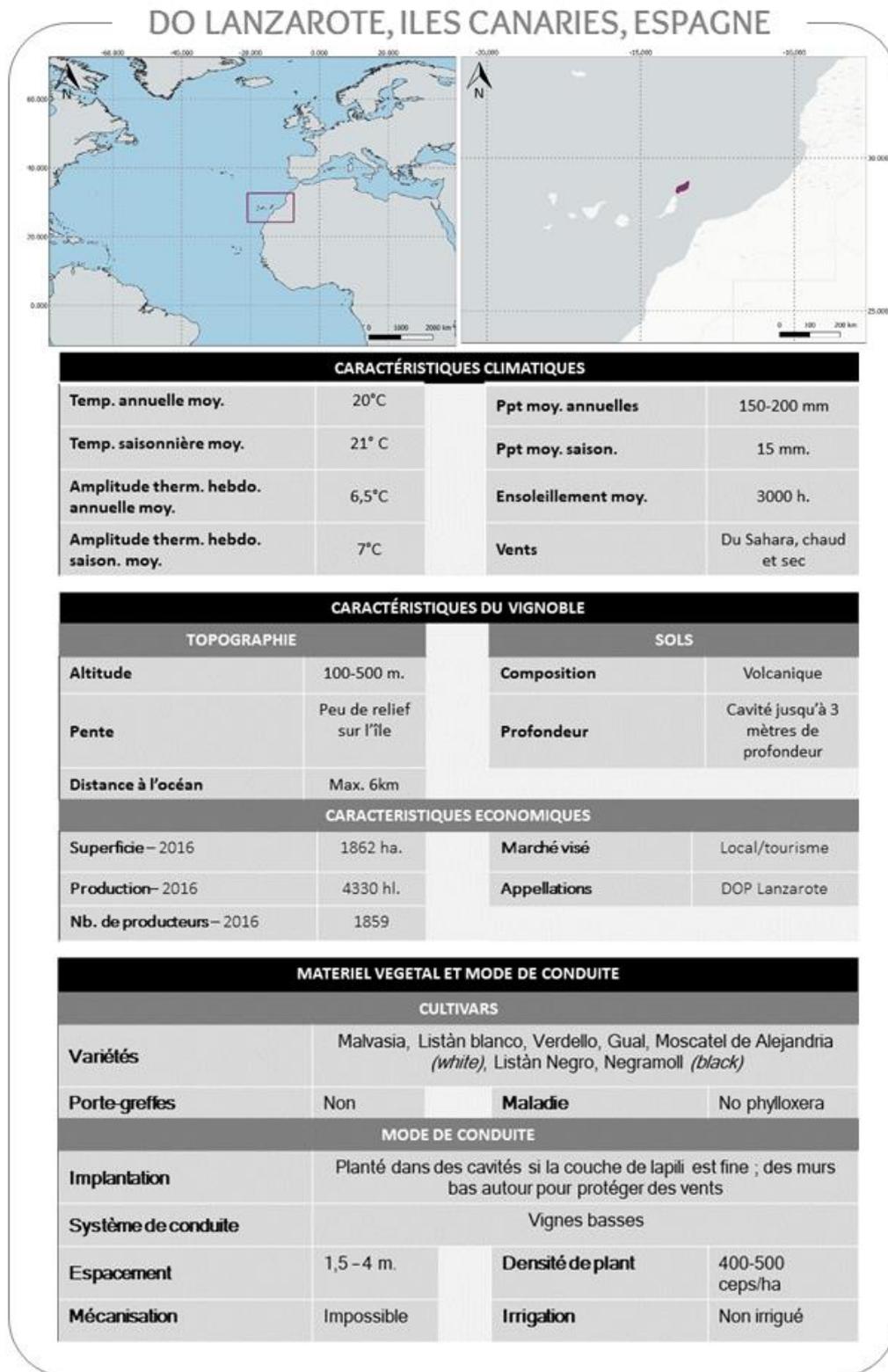


Figure 11 - Exemple de la première typologie réalisé. Vignobles DO Lanzarote, îles Canaries, Espagne

Au-delà de ces spécificités, certains facteurs locaux (distance la mer, l'altitude, la pente, topographie d'un site) vont avoir des incidences sur la répartition spatiale et qualitative des vignobles (Bonnardot *et al.*, 2012 ; Quénot, 2014a ; Quénot et Bonnardot, 2014). En Nouvelle-Zélande par exemple, du fait d'un contexte topographique très accidenté, la vigne est souvent confrontée à la problématique du gel (Tait, 2008) (Figure 9). Même si la topographie complexifie les projections de changement climatique (Hamon *et al.*, in prep.), plusieurs études utilisant divers modèles et scénarios de changement climatique s'accordent à démontrer que le risque de gel est toujours moins important sur les espaces côtiers (Hamon *et al.*, in prep. ; Tait, 2008).



Figure 12 - Vignobles néozélandais exposés au gel, régions de Waipara et Marlborough, octobre 2020

Crédit photo : Hervé Quénot

Si la topographie joue un rôle important sur les paramètres climatiques, certains modes de conduite permettent également de cultiver la vigne dans des conditions parfois extrêmes. En raison d'une rugosité généralement moins importante que sur les espaces continentaux, la vitesse du vent est habituellement plus forte sur les îles et le littoral (Herrman et Planchon, 1998 ; Regnauld et Planchon, 2003). Les vignes proches des côtes sont donc plus soumises à la contrainte de vent que les vignobles continentaux. En ce sens, certains archipels particulièrement exposés ont développé des modes de conduite agronomique spécifiques pour limiter les effets du vent (Drumonde-Neves *et al.*, 2017 ; Heras-Roger *et al.*, 2017 ; Madruga *et al.*, 2015), des températures extrêmes, ou pour gérer le déficit hydrique des vignes. Ainsi, cette seconde section de la typologie proposée (Thibault *et al.*, 2020b, 2020a, 2022) porte alors sur les caractéristiques agronomiques des espaces littoraux et insulaires, regroupant les thématiques du mode de conduite, du matériel végétal ainsi que du sol de ces vignobles.

2.1. Le mode de conduite

Le mode de conduite d'un vignoble regroupe l'ensemble des pratiques pour la culture de la vigne (mode de taille de la vigne, palissage, densité de plantation, enherbement, etc.). Si nous imaginons généralement des vignes palissées, conduites en Guyot ou en cordon de Royat (Figure 14), certains modes de conduites spécifiques permettent de minimiser certains facteurs climatiques et de gérer le déficit hydrique sans recourir à l'irrigation (Drumonde-Neves *et al.*, 2017). Les vignes rampantes ou en conduite basse sont des modes de conduites bien adaptées aux régions soumises à des vents importants (Boissinot, 2001). Ainsi, aux Canaries, il est possible de trouver des vignes en *rastra*, rampantes à la surface du sol à Lanzarote ou Tenerife, ou conduites en basses treilles s'allongeant en longs cordons –*parrales* ou *cordón trenzado* (Tenerife uniquement) (Figure 13, Figure 14) (Heras-Roger *et al.*, 2017 ; Huetz de Lemps, 2002 ; Morales, 2011).

Ces systèmes de taille spécifiques peuvent être complétés de protections naturelles contre les vents brûlants et desséchants comme : des murets de pierres volcaniques appelés *currais* aux Açores (Azevedo, 2014), des murs de pierres sèches nommés *terraces* à Pantelleria (Ingrassia *et al.*, 2018 ; Mantia *et al.*, 2011), des murs bas en demi-cercles aux Canaries (Heras-Roger *et al.*, 2017 ; Scherrer *et al.*, 2009). Les vignes peuvent également être adossées aux murs de pierres sèches des terrasses comme à Tenerife (Huetz de Lemps, 2002) (Figure 13). En plus d'être un moyen de lutte contre les vents, ces murets de pierres emmagasinent la chaleur en journée (Rochard *et al.*, 2019) et la restituent à la vigne à la tombée de la nuit (Alcaraz, 2001).

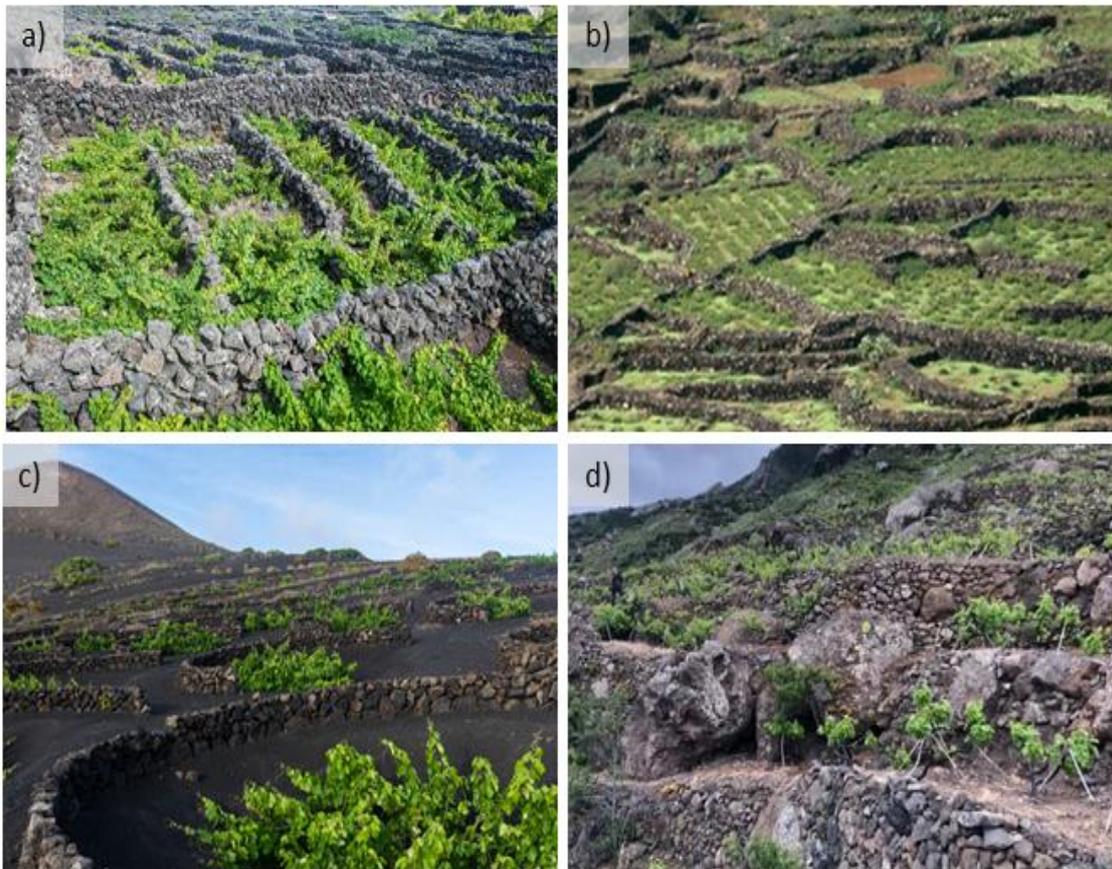


Figure 13 - Murets de pierres protégeant les vignes des vents aux Açores (a), à Pantelleria (b), aux Canaries (c) et à Tenerife (d)

Crédit photos : Google Images

Dans l'archipel des Açores, outre les vignes plantées sur des terres arables qui peuvent être palissées, il existe deux modes de conduites de vignes non palissées : *lajido* ou *biscoito* (Figure 14). Ces noms correspondent aux deux principales régions viticoles présentes sur l'archipel. Les plantes sont placées dans les fissures irrégulièrement réparties dans des coulées de lave solidifiée presque non modifiées (*lajido*) ou dans des sols recouverts d'épaisses couches de pierres (*biscoito*) (Drumonde-Neves *et al.*, 2017 ; Madruga *et al.*, 2015).

Sur l'île de Santorin, les vignes sont conduites en formes de corbeilles, ou gobelet couronnes, appelées *kouloura* (Figure 14) (Etcheverria, 2015 ; Vavoulidou *et al.*, 2006). Héritée de l'Antiquité, la conduite en couronne consiste à entrelacer les sarments de vigne afin de former un nid, une corbeille. Ce mode de conduite permet de protéger la vigne des vents forts et d'une exposition au soleil trop intense pour les baies (Etcheverria, 2015).

A Pantelleria (Italie), les vignes sont conduites en gobelet -*Vite ad Alberello*-, selon des pratiques culturelles transmises depuis plusieurs générations (Martinet, 2021 ; UNESCO,

2014). Inscrite au patrimoine culturel immatériel de l'humanité depuis 2014, cette technique consiste à planter la vigne dans une cavité et la tailler de manière à obtenir un « *buisson organisé de manière radiale* » (Figure 14) (UNESCO, 2014). Cette technique d'implantation dans une cavité est reprise aux Canaries, notamment à Lanzarote où les vignes en *rastra* sont plantées dans des entonnoirs pouvant mesurer jusqu'à 2.5m de profondeur et près de 3m de diamètre (Dolanzarote.com). Ces cavités permettent aux vignes d'être mieux protégées des vents, mais également de trouver un sol plus fertile et favoriser le développement racinaire. Au fond de chaque trou, une couche de cendres volcaniques –*picón* ou *lapili*- permet de retenir l'humidité et en redonner à la plante, mais également d'emmagasiner la chaleur en journée et la restituer à la tombée de la nuit (Heras-Roger *et al.*, 2017).

Dans ces approches très locales et généralement peu mécanisées de la viticulture, les densités de plantations et les productions sont plus faibles que pour les régions moins contraintes (Vavoulidou *et al.*, 2006). De façon générale, ce sont dans les pays de l'Ancien Monde⁶ où l'on trouve le plus de modes de conduite « particuliers », qui sont des savoirs faire traditionnels, quelques fois reconnus par l'UNESCO et qui permettent de s'adapter à des conditions particulières. Pour autant, des modes de conduites plus « courants » sont présents dans ces pays de l'Ancien Monde, comme en Corse, sur le pourtour Atlantique (Belle-Île-en-Mer, l'île d'Arz, Sarzeau, Theix, etc.), Saint-Honorat, etc.

⁶ Les pays de l'Ancien Monde sont des pays qui, traditionnellement, sont considérés comme des régions viticoles généralement européennes comme la France, l'Italie, l'Allemagne, l'Espagne, le Portugal, la Grèce, etc. Cette expression permet de les distinguer des pays qui ne sont, traditionnellement pas des régions viticoles, dites du Nouveau Monde, comme l'Argentine, l'Australie, le Canada, le Chili, la Nouvelle-Zélande, les Etats-Unis, etc.



Figure 14 - Différentes tailles de vigne, a) Guyot simple, b) Guyot double, c) Cordon de Royat, d) Cordon trenzado, e) Bisquito, f) Couronne ou *kouroula*, g) Vite ab Alberello, h) Gobelet, i) Pergola
 Crédits photos : Google image

2.2. Le matériel végétal

L'identité d'un terroir est généralement associée à un cépage principal, souvent issu d'une sélection variétale permettant de s'adapter aux contraintes locales (van Leeuwen et Seguin, 2006). Mais à l'image de la viticulture, la répartition actuelle des cultivars ne se limite pas uniquement à une adéquation biologique : elle est aussi le fait de facteurs historiques et sociaux (Mosedale *et al.*, 2016). Du fait de divers facteurs (recherche de meilleurs rendements et de production régulière, augmentation des teneurs en sucre, maladies, etc.), la diversité génétique des vignes tend à se réduire à échelle mondiale (This *et al.*, 2006). A la fin du XIX^e siècle, un puceron ravageur et parasite de la vigne, le phylloxera, atteint l'Europe dans un premier temps, puis le reste du monde. Originaire d'Amérique, ce puceron occasionne des dégâts considérables à échelle mondiale. Les vignes malades sont arrachées et remplacées par des variétés greffées sur un porte greffe américain (Carton *et al.*, 2007 ; Legros, 1993). En effet, la vigne américaine est l'une des seules souches résistante au phylloxera. Les vignobles européens et plus largement, les vignobles mondiaux, subissent des pertes importantes en termes de superficie. En parallèle, la mondialisation et la démarcation qualitative de certains cultivars ont favorisé la disparition de certaines variétés (El Aou-ouad *et al.*, 2022). Ainsi, en 2015, sur 10 000 variétés de vignes connues dans le monde, 13 cultivars couvraient plus d'un tiers des vignobles mondiaux et 33 représentaient 50% de ces vignobles (OIV, 2017) (Tableau 7, Figure 15).

Variété	Couleur	Destination	Surface (ha)	% monde 2015
Kyoho	Noir	Table	365 000	4.8
Cabernet Sauvignon	Noir	Cuve	341 000	4.5
Sultanina	Blanc	Table, séchage, cuve	273 000	3.6
Merlot	Noir	Cuve	266 000	3.5
Tempranillo	Noir	Cuve	231 000	3.1
Airen	Blanc	Cuve, Brandy	218 000	2.9
Chardonnay	Blanc	Cuve	210 000	2.8
Syrah	Noir	Cuve	190 000	2.5
Grenache noir	Noir	Cuve	163 000	2.1
Red Globe	Noir	Table	159 000	2.1
Sauvignon blanc	Blanc	Cuve	123 000	1.6
Pinot noir	Noir	Cuve	112 000	1.5
Ugni Blanc	Blanc	Cuve, Brandy	111 000	1.5

Tableau 7 - Répartition des 13 principales variétés mondiale en 2015

Source OIV, 2017

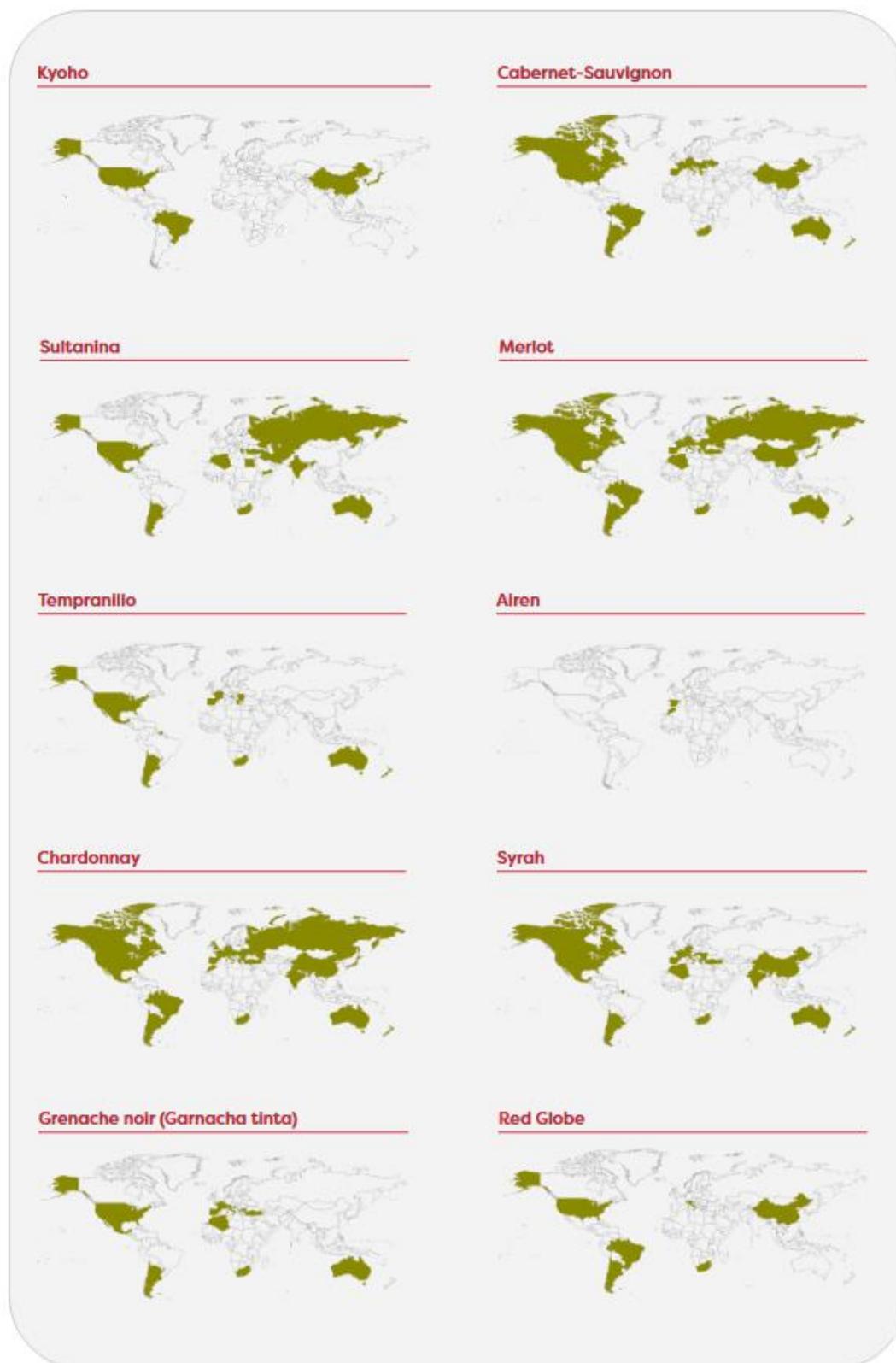


Figure 15 - Répartition spatiale des 13 principales variétés dans le monde en 2015
 Source : OIV, 2017

Dans le cas de la viticulture littorale et insulaire, les pays viticoles du Nouveau Monde comme la Nouvelle-Zélande, l'Australie ou l'Afrique du sud se focalisent sur quelques cépages internationaux facilement identifiables. En Nouvelle-Zélande par exemple, le Sauvignon blanc est le cépage le plus implanté, représentant plus de la moitié du vignoble, suivi par le Pinot noir (environ 16%) et le Chardonnay (9%). En Australie, le Syrah représente un peu moins de 30% de la surface totale des vignobles, 17% pour le Cabernet Sauvignon et 17% pour le Chardonnay (FranceAgriMer, 2016c, 2016b, 2016a). Les cépages classiquement utilisés dans les régions traditionnelles sont considérés comme un gage de qualité et de goûts constants (Schirmer, 2007).

A l'inverse, en raison de leurs caractéristiques géographiques (éloignement au continent) et de leurs conditions climatiques particulières, certaines îles ont pu conserver des variétés anciennes et rares (Scherrer *et al.*, 2009). Sur les îles Canaries, si le Listàn Negro, Negramoll, le Tintilla ou le Malvoisie sont des cépages espagnols dominants, des cépages canariens comme le Bremajuelo ou le Verijadiego ont été sauvés de l'extinction et sont présents uniquement sur l'archipel (Heras-Roger *et al.*, 2017 ; Scherrer *et al.*, 2009). Le Baboso Negro, un cultivar rouge, est présent sur l'archipel des Canaries et celui du Cap Vert sous le nom de Tinta Preta (Heras-Roger *et al.*, 2017). En Grèce, où 26% de la superficie des vignobles est insulaire, près de 200 variétés indigènes et internationales sont comptabilisées (Koufos *et al.*, 2014). Le Roditis, un cépage à la peau rosé, représente presque 14% des vignes grecques, suivi de l'Agiorgitiko et le Xinomavro, tous les deux des cépages rouges locaux (Koufos *et al.*, 2014). Si des cépages internationaux sont aussi présents en Grèce comme le Chardonnay, le Sauvignon blanc, le Syrah ou encore le Merlot, ces derniers sont implantés au nord de la Grèce, dans des régions plus continentales où le climat est plus chaud (Koufos *et al.*, 2018).

2.3. Le sol

Parce que le sol influence directement la vigne et sa croissance, il est l'un des éléments principaux de la notion de terroir. Mais si les sols peuvent être cartographiés sur une base pédologique, il reste assez compliqué d'assimiler ce type de données au potentiel qualitatif de la vigne. En effet, la vigne peut s'épanouir sur une grande diversité de sols (van Leeuwen et Seguin, 2006) mais ce sont généralement les sols pauvres qui permettent la production de vins de plus grande qualité (van Leeuwen et Seguin, 2006).

Parmi les propriétés pédologiques influençant la vigne, on peut citer la texture du sol qui détermine la porosité du sol et ses réserves en eau ou encore, la profondeur qui joue sur le développement racinaire (Deloire *et al.*, 2006 ; Le Roux, 2017). La porosité d'un sol est un facteur important pour la bonne croissance de la vigne puisqu'en saison humide, un sol poreux permet d'évacuer facilement le surplus d'eau, et en période estivale, de disposer d'une bonne réserve hydrique (Marre, 2004). Ainsi, sur un sol relativement poreux et donc bien drainé, un stress hydrique estival permet une meilleure qualité des grappes, plus concentrées en sucre, en anthocyanes et en composés phénoliques (Lazcano *et al.*, 2020 ; van Leeuwen et Seguin, 1994).

Il est intéressant de souligner que plusieurs archipels n'ont jamais été atteints (ou peu) par le phylloxera du fait de leur éloignement aux continents mais également grâce à leurs sols (Buonincontri *et al.*, 2017 ; Etcheverria, 2015). En effet, beaucoup d'îles étant d'origine volcaniques, leurs sols sont couverts de cendres et de pierres ponces volcaniques (Amato et Valletta, 2017 ; Buonincontri *et al.*, 2017 ; Etcheverria, 2015 ; IFV Sud-Ouest, 2012 ; Madruga *et al.*, 2015 ; Nicolosi *et al.*, 2016 ; Tudisca *et al.*, 2011 ; Vavoulidou *et al.*, 2006). Or, un sol volcanique sablonneux ou volcanique inhiberait la prolifération du phylloxera (Buonincontri *et al.*, 2017 ; Etcheverria, 2015 ; Mantia *et al.*, 2011). Dans certains vignobles, de la roche volcanique broyée est ajoutée aux pieds des vignes (Heras-Roger *et al.*, 2017 ; Huetz de Lemps, 2002 ; Morales, 2011). Outre l'inhibition potentielle du phylloxera, la roche volcanique permet d'absorber les eaux de pluie ou l'humidité nocturne pour la restituer aux vignes en journée (Heras-Roger *et al.*, 2017 ; Morales, 2011).

3. Configurations spatiale et socio-économique des vignobles littoraux et insulaires

Si les espaces littoraux et insulaires semblent être des espaces pertinents pour la culture de la vigne, ils n'en restent pas moins des espaces très contraints (tourisme, urbanisme, etc.). Afin de d'identifier les possibilités d'intégration ou d'extension de vignobles il est nécessaire d'identifier les principaux facteurs socio-économiques qui fondent la structure spatiale des territoires viticoles littoraux et insulaires.

La description des configurations spatiales et socio-économique représente la dernière section de la typologie présentée. Cette section regroupe la superficie des vignobles ainsi que la production annuelle moyenne, le marché visé (vignoble associatif, commercial à l'international, en local, etc.), la présence d'appellations, ainsi que l'existence d'un passé viticole.

La superficie du vignoble est un élément plutôt représentatif de l'intégration de l'activité sur les îles et le littoral. Sur des espaces si concurrentiels, la superficie exploitée permet de traduire de l'attrait et de la place accordée à l'activité. Par exemple, sur l'île Pico dans l'archipel des Açores (Portugal), la viticulture a connu un déclin jusqu'en 2004 où l'activité est redevenue attractive. L'inscription de ces vignobles au patrimoine mondial de l'UNESCO a permis un soutien financier et un regain d'intérêt des propriétaires terriens et producteurs de vin (Drumonde-Neves *et al.*, 2017 ; Madruga *et al.*, 2015). La superficie des vignobles peut également être mise en relation avec le marché visé : des vignobles de taille modeste et/ou dont la production est faible ou modérée sont, généralement, destinés à une production locale. A l'inverse, une volonté d'export à l'internationale nécessite des surfaces plus importantes. Il est tout de même important de souligner que la superficie d'un vignoble est en relation avec la surface disponible en particulier sur les espaces insulaires. En effet, la surface de l'île peut devenir un facteur limitant pour l'expansion d'un vignoble, et ainsi restreindre les stratégies de commercialisation du vin (Viníles, 2022).

Mais le marché visé par le vignoble ne se cantonne pas uniquement à la vente à échelle locale, nationale ou internationale. La visée touristique est également à prendre en compte puisque beaucoup de territoires pratiquent la mise en tourisme de leurs activités économiques. En ce sens, l'oenotourisme est un exemple très concret de « *transformation de l'atmosphère gastronomique locale en atout attrait touristique* » (Etcheverria, 2015); la qualité du vin est alors définie par et pour les touristes, puisque ce sont ces mêmes personnes qui participent à

l'économie touristique de la région (« *wine tour* », musées, dégustations, etc.). Cette caractéristique économique et touristique va généralement de pair avec la présence d'un passé viticole et des traditions.

Dans la perspective de proposer une première typologie des différentes configurations des vignobles insulaires, un atelier du Master 2 Sciences de la Mer et du Littoral (SML) de l'Université de Bretagne Occidentale et de l'Institut Universitaire et Européen de la Mer (IUEM) baptisé VINÎLES a été mené au cours du premier semestre de l'année universitaire 2022-2023. A l'issue de ces travaux, une table ronde « *Les îles : (nouveaux) terroirs viticoles ? Regards sur les îles du Ponant* » a été réalisée en février 2022, et a regroupé les différents intervenants suivants : Aurélien Berthou⁷, Charlotte Courant⁸, Grégory Debruyne⁹, Daniel Lorcy¹⁰, Eric Rouvellac¹¹ et moi-même. L'ensemble de ces réflexions a contribué à catégoriser les différentes configurations socio-économiques des vignobles insulaires.

Ces différentes configurations reprennent les éléments de typologie précédente, et permettent de comprendre les enjeux économiques, sociaux et culturels de ces vignobles sur des espaces autant contraints que les îles et le littoral.

⁷ Aurélien Berthou, ingénieur agronome spécialisé en viticulture-œnologie, viticulteur, référent de la filière viticole du lycée de Kerplouz-La Salle à Auray (Morbihan).

⁸ Charlotte Courant, chargée de mission pour l'Association des Îles du Ponant

⁹ Grégory Debruyne, maraîcher et employé d'une exploitation viticole à Belle-île-en-mer (Morbihan).

¹⁰ Daniel Lorcy, président de l'association In Vino VeritArz, le vignoble du « Coteau de Liouse » à l'île d'Arz (Morbihan).

¹¹ Eric Rouvellac, professeur des universités

3.1. Îles-pays, vastes vignobles et productions intensives destinées à l'exportation

Sur de vastes îles, généralement des îles-pays ou îles-continentes, les contraintes foncières (conflits d'activités ou de voisinage, prix du foncier, etc.) sont moins intenses que sur des îles de plus petites superficies. En effet, sur de petites îles, du fait de leurs limites géographiques restreintes, les ressources foncières sont plus limitées, la pression anthropique plus importante et les « *concurrences foncières entre usages urbano-touristiques et usages traditionnels (agricole notamment) sont exacerbées alors que la terre est investie d'une forte valeur symbolique* » (Tafani, 2011). Ainsi du fait de la taille des îles-continentes ou île-pays, les parcelles dédiées à l'agriculture et à la culture de la vigne sont de grande superficie (Legouy et Boulanger, 2015) (Figure 16). Les productions sont majoritairement destinées à l'exportation (FranceAgriMer, 2016a, 2016b, 2016c ; Legouy et Boulanger, 2015). Sûrement du fait de leurs implantations assez récentes, les réglementations concernant la production de vin sont peu encadrées (Barker, 2004 ; FranceAgriMer, 2016b, 2016c ; Laesslé, 2016). Les deux exemples principaux de ce type de configuration sont la Nouvelle-Zélande et l'Australie.



Figure 16 - Vignobles néozélandais, région de Marlborough

Crédit photo : Cyril Tissot

La Nouvelle-Zélande et l'Australie sont toutes les deux considérées comme des régions viticoles du Nouveau-Monde. D'un point de vue purement chronologique, la distinction de l'Ancien Monde (ou vieille Europe) et le Nouveau Monde « *renvoie aux pays producteurs d'Europe et du bassin méditerranéen et à leurs successeurs issus des colonies européennes* » (Laesslé, 2016). Les études de Barker et Laesslé ajoutent également deux dimensions à cette dichotomie : le Nouveau Monde possède une législation permissive et une conception plus industrielle (vins standardisés, références aux cépages et à une image de marque mais non à des lieux de production), tandis que l'Ancien Monde renvoie une législation plus détaillée et formelle et les vins produits font plus souvent l'objet d'appellations et dénominations (Barker, 2004 ; Laesslé, 2016).

Cependant si les surfaces, les productions et les volumes exportés sont importants par rapport à des îles de plus petites tailles, le poids du secteur viticole n'occupe pas nécessairement une place significative pour ces îles-pays/îles-continentes. En Australie, si la surface allouée à la culture de la vigne était d'environ 146 000 ha en 2021 soit quasiment 2% des vignobles mondiaux (OIV, 2022), à l'échelle du pays la culture de la vigne n'est pas dominante (Tableau 8). En Nouvelle-Zélande, la surface accordée à la culture de la vigne est cependant un peu plus importante à l'échelle du pays.

Australie - 2020		Nouvelle-Zélande - 2020	
Cultures	Superficie en ha	Cultures	Superficie en ha
Blé	9 863 184	Blé	45 680
Orge	5 040 903	Orge	45 145
Colza	2 034 057	Vigne	35 576
Avoine	815 954	Maïs	15 566
Lupins	484 240	Kiwi	15 523
Lentilles	412 381	Pomme de terre	10 901
Canne à sucre	366 426	Pommes	9 789
Pois chiche	26 3000		
Petits pois	247 616		
Fèves	214 892		
Sorgho	204 113		
Vignes	130 018		

Tableau 8 - Superficie des principales cultures en Australie et en Nouvelle-Zélande en 2020

Données : FAO, 2023

Bien que l'activité viticole ne soit pas l'activité agricole la plus représentée, et que les surfaces allouées à la vigne restent modestes à échelle mondiale, ces pays se dénotent par leur productivité et les exportations associées (Tableau 9). Si les vignobles néozélandais représentent un peu moins de 0.6% de la superficie des vignobles mondiaux en 2020, la production de vin néozélandais représente un peu de 1% de la production totale mondiale. De même, l'Australie représente 2% de la surface mondiale en vigne, mais 4% de la production totale de vin. La même année, la Nouvelle-Zélande exporte 2.9 Miohl, soit 2.7% des exportations de vins (bouteilles, effervescent, BiB et vrac confondus) et l'Australie 7.5 Miohl et représente un peu plus de 7% des exportations mondiales.

	Surfaces viticoles		Production en Miohl		Exportation en Miohl	
	<i>en mha</i>	<i>% mondial</i>	<i>en Miohl</i>	<i>% mondial</i>	<i>En Miohl</i>	<i>% mondial</i>
Australie	146	2 %	10.6	2.7 %	7.5	7.05 %
Nouvelle-Zélande	40	0.6 %	3.3	1.27 %	2.9	2.7 %

Tableau 9 - Surfaces viticoles, production et exportation de vins pour la Nouvelle-Zélande et l'Australie en 2020

Données : OIV, 2022

3.2. Vignobles insulaires et de grandes renommées

Implantés sur des petites îles des régions de l’Ancien Monde, certains vignobles bénéficient d’une renommée internationale de par la qualité des vins produits et de leur mode de conduite traditionnel et parfois même très local. Ces vignobles sont généralement de taille et de productions modestes puisque, au-delà de la taille limitée de l’île, la culture de la vigne s’est adaptée aux conditions locales des sites (cépages locaux, modes de conduite traditionnels et/ou adaptés à des conditions climatiques particulières, etc.). Les exemples d’îles relatifs à cette configuration de « viticulture spécifique et de renom » sont l’île de Saint-Honorat (France), l’île d’Elbe (Italie), l’île de Santorin (Grèce), Tenerife (Espagne) encore Lanzarote (Espagne) (Figure 17).



Figure 17 - Vignobles « spécifiques » insulaires : a) Vignoble de l'Abbaye de Lérins à Saint-Honorat b) Vignoble de Santorin conduite en corbeille c) Vignoble de Ténérife conduit en rastra d) Vignoble de Lanzarote implanté en entonnoir

Crédit photo : Google image

Pour l'Abbaye de Lérins sur l'île de Saint-Honorat (France), l'implantation du vignoble est estimée autour du Moyen-Âge, et sûrement un peu avant pour des besoins eucharistiques (production de vin de messe). La partie « professionnelle » de ce vignoble est datée autour des années 1990 (Thomas, 2011). Sur cette île de 40 ha, le vignoble occupe 8.7 ha soit quasiment 22% de la superficie totale de Saint-Honorat, ce qui fait de ces vignes un élément marquant de ce paysage insulaire. L'ensemble de l'entretien du vignoble, des récoltes et du processus de vinification sont réalisés par les moines de Lérins (Thomas, 2011). En moyenne, avec un rendement moyen de 35 hl/ha, 40 000 bouteilles sont produites chaque année avec des prix variant d'une vingtaine à une centaine d'euros (excellencedelerins.com). C'est cette commercialisation et la mise en avant de l'image monastique de ce vignoble et de ses produits qui alimentent sa réputation.

Sur l'île de Santorin (Grèce), la vigne est cultivée depuis le 5^e siècle avant J.C., et « de nombreux ceps de vignes sont anciens de plus de 100 ans et certains auraient jusqu'à 300 voire 400 ans

» (Etcheverria, 2015). La vigne est très ancrée dans le paysage de l'île puisqu'elle représente 1400 ha, soit un peu plus de 18% de la surface totale de l'île (Etcheverria, 2015). Les conditions climatiques particulières de l'île (vents forts et desséchants, fortes chaleurs) sont hostiles pour la végétation (Stasinopoulos, 2006), à l'exception de la vigne qui est conduite en corbeille afin de lutter contre ces extrêmes. La richesse historique viticole, les vins produits ainsi que la conduite spécifique de la vigne ont permis une commercialisation particulière des vins. En ce sens, l'œnotourisme est très implanté sur cette île, et mêle la dégustation des vins, la nourriture locale, les savoirs faire et les adaptations particulières ; ainsi, les touristes assimilent les diverses expériences et souvenirs au vin de Santorin (Belias *et al.*, 2018 ; Etcheverria, 2015). Une Appellation d'Origine Protégée (AOP) a même été créée pour le Vinsanto, un vin produit à base d'Assyrtiko et d'Aidani : les raisins sont récoltés, laissés au soleil durant une dizaine de jours, broyés, puis le vin est élevé en fûts de chêne (Domizio et Lencioni, 2011).

Si sur certaines îles la vigne est cultivée depuis des décennies comme à Ténérife, Lanzarote ou à Santorin, l'implantation d'un vignoble est quelquefois plus récente (Saint-Honorat). Dans tous les cas et dans ce type de configuration, l'activité viticole est fortement ancrée dans le paysage et bien acceptée par les locaux puisqu'elle alimente le secteur économique et touristique de l'île.

3.3. Vignobles traditionnels, avec mise en valeur insulaires et transition qualitative

Pour cette configuration de vignobles, la Corse (France), la Sicile (Italie), la Sardaigne, Chypre ou encore la Grèce et ses îles, sont de bons exemples. Ces vignobles ont des superficies plus importantes que ceux de la configuration précédente, mais les îles sur lesquelles ils sont implantées sont également plus grandes. Ils sont par conséquent des éléments un peu moins marquants du paysage, et leur notoriété sont un peu plus modestes que ceux des vignobles insulaires de grande renommée. Cependant, l'histoire de leur territoire est associée un passé viticole. Si à l'origine ces vignobles avaient une visée de production plutôt quantitative, un tournant s'est opéré afin de proposer des produits plus qualitatifs (Bavaresco *et al.*, 2014 ; CIV-Corse, 2010a ; Legouy et Boulanger, 2015 ; Thomas, 2012 ; Vrontis et Paliwoda, 2008 ; Zoumides *et al.*, 2017).

La superficie du vignoble corse a ainsi connu d'importantes fluctuations passant de 4 678 ha en 1912, à 24 932 ha en 1970, puis à 6 676 ha en 2010 (Legouy et Boulanger, 2015). En 2020, 5 780 ha de vignes sont comptabilisés sur l'île (vinsdecorse.com). Ces variations sont le reflet de divers cycles économiques. Ainsi, les années 1960-1970 sont marquées par le productivisme avec l'arrivée des rapatriés d'Algérie ; ces propriétaires terriens ont permis une large expansion du vignoble corse passant de 8 500 ha en 1950, à 27 000 ha en 1976 (année de l'apogée du vignoble) (CIV-Corse, 2010b). La vigne occupait alors 20 à 30% de la surface agricole utilisée (SAU) totale de l'île (Legouy et Boulanger, 2015). La crise viticole de 1975 (récoltes mondiales abondantes mais non vendues) a engendré un plan d'arrachage conséquent qui a drastiquement réduit le vignoble corse (CIV-Corse, 2010a). Ce plan d'arrachage a permis de lutter contre la surproduction, et a été suivi d'un programme d'encépagement traditionnel. Désormais, les vignobles corses tendent à produire des vins de qualité. Pour preuve, l'île détient 9 AOP et 2 Indication Géographique Protégé (IGP) pour une production de 380 000 hl (Chambre d'agriculture de Corse, 2023).

Si Chypre est souvent décrite comme l'une des premières îles viticoles de l'histoire (Vrontis et Paliwoda, 2008), la superficie de son vignoble s'est drastiquement réduite. La superficie des vignobles chypriotes était d'environ 20 000 ha avant et au début des années 2000, contre 7 773 ha en 2020 (OIV, 2023). Le déclin de la surface ce vignoble a commencé en 2004 avec l'entrée du pays dans l'Union Européenne. En effet, la réglementation de l'Union Européenne concernant la viticulture vise à réduire la quantité produite, au profit de la qualité (Zoumides *et*

al., 2017). Chypre a ainsi entamé une reconversion et s'est concentrée sur des cépages plus locaux (Thomas, 2012 ; Zoumides *et al.*, 2017). Les vignobles de Cabernet Sauvignon ou de Merlot ont donc diminué au profit de cépages comme le Mavro ou le Xynisteri (Thomas, 2012).

Pour ces vignobles, outre le caractère insulaire mis en avant par les producteurs, ce sont l'historique et surtout la transition d'une culture quantitative à qualitative qui permettent de les distinguer. Dans la plupart des cas, les surfaces en vignes ont drastiquement baissé (Tableau 10) afin de privilégier des produits plus locaux, plus représentatifs de leurs particularités et surtout plus qualitatif (Bavaresco *et al.*, 2014 ; Legouy et Boulanger, 2015 ; Thomas, 2012 ; Zoumides *et al.*, 2017).

	Superficie en ha		Perte totale
Corse	24 932 (1970)	5 780 (2020)	19 152 ha en 50 ans, soit 76.8%
Chypre	20 190 (1995)	7 773 (2020)	12 417 ha en 25 ans, soit 61.5%
Grèce **	236 000 (1961)	112 000 (2020)	124 000 ha en 59 ans, soit 52.5%
Sardaigne	68 000 (1970)	20 000 (2010)	48 000 ha en 40 ans, soit 70.6%
Sicile	168 000 (1970)	103 000 (2013)	65 000 ha en 43 ans, soit 38.7%

** Grèce, continent et îles confondues

Tableau 10 - Evolution des surfaces en vigne pour la Corse, Chypre, la Grèce, la Sardaigne et la Sicile
Données : Bavaresco *et al.*, 2014 ; Legouy et Boulanger, 2015 ; FranceAgriMer, 2016 ; OIV, 2023

3.4. Vignobles de petite taille, à commercialisation et rayonnement à l'échelle insulaire

Cette configuration regroupe des vignobles de petites tailles implantés sur des îles-pays. La superficie totale des surfaces en vigne est généralement anecdotique par rapport à la taille de l'île. Ces vignobles sont peu représentés dans la production mondiale du vin et dans les exports à l'étranger. Si ces pourcentages peuvent s'expliquer, en partie, par la superficie modeste des vignobles, la principale raison est que la commercialisation des vins produits se fait à échelle de l'île, voire à l'échelle très locale. Les exemples les plus concrets de cette configuration de vignoble sont l'Angleterre, le Japon et Madagascar, mais Bali ou l'île Pelée (Canada) peuvent également entrer dans cette catégorie.

En Angleterre, après la diffusion du christianisme au cours du VI^e siècle, les vignobles se sont étendus, et cette extension s'est renforcée avec l'arrivée du clergé français pendant la conquête normande. En 1556, la dissolution des monastères et le climat relativement frais et humide de l'Angleterre ont nettement fait chuter la surface en vignes du pays (Legouy et Boulanger, 2015). La culture commerciale de la vigne a repris petit à petit au Royaume-Uni, à partir du milieu du XX^e siècle, avec l'implantation d'un vignoble commercial dans le Hampshire et s'accélère dans les années 1960-1970 (Clout, 2013 ; Legouy et Boulanger, 2015 ; Théry, 1990). Avec plus de 300 vignobles au début des années 1980, la surface viticole du pays était estimée à 500 ha en 1985 (Clout, 2013). En 1992, le plan « vins de qualité » a été mis en place afin de produire des vins inspirés du système d'AOP français. En 2010, le Royaume-Uni comptabilisait un peu plus de 1 300 ha de vignes, répartis sur 380 vignobles, la majeure partie étant située dans le sud et l'est de l'Angleterre où le climat est un peu plus chaud et sec (Clout, 2013 ; Legouy et Boulanger, 2015). Si ces vignobles sont très petits (moyenne de 3.5 ha), la plus grande partie est ouverte au public et pratique la vente directe. En 2023, seules 26 entreprises étaient fermées au public, soit un peu moins de 7% des entreprises viticoles du Royaume-Uni (Clout, 2013). Les exports de vins étant très peu représentés, les vignobles sont des éléments majeurs des stratégies économiques de ces régions (Legouy et Boulanger, 2015).

Sous l'ère Meiji¹² au Japon, la production de vin a été intégrée au programme national de modernisation, bien que la vigne était présente depuis plusieurs décennies (Holden, 1995 ; Yamada et Sato, 2016). En effet, considéré comme une boisson orientale, le vin représentait

¹² Ere Meiji : période historique au Japon comprise entre 1868 et 1912

également la civilisation moderne avancée (Wang, 2021). Dès les débuts, la culture de la vigne était un projet de gouvernance culturelle ayant pour but de moderniser les modes de vies des japonais. Si la production de vin n'a pas été florissante durant la première partie du XXe siècle, la Seconde Guerre Mondiale (SGM) a perturbé cette industrie : la politique du pays a incité à produire du vin en masse, afin d'extraire un acide pour complément alimentaire (crème de tartre) (Wang, 2021). Après la SGM, la production de vin a repris son cours mais a longtemps été critiquée puisque les méthodes de production étaient loin d'être comparables aux méthodes occidentales. Ce n'est qu'au début des années 2000 que les japonais ont abandonné leurs méthodes industrielles, pour produire un vin plus traditionnel à l'image de l'occident. Aujourd'hui encore, la viticulture japonaise reste minoritaire tant sur les surfaces cultivées (17 738 ha en 2020), que sur la production (805 000hl). L'œnotourisme est fortement encouragé et permet aux producteurs de vendre en direct leurs productions. Les touristes japonais sont d'ailleurs fortement encouragés par le gouvernement à visiter les vignobles et à échanger avec les vignerons (Wang, 2019). A ce titre, le domaine viticole de la région de Yamanashi a été inscrit au « patrimoine japonais » par le gouvernement, ce qui accroît considérablement sa popularité (Wang, 2021). Si la consommation de vin est d'environ 3.3 Miohl en 2021, l'importation a une part très importante (2.4 Miohl, pour une valeur de 1.4 Mrd €) (OIV, 2022). L'exportation des vins japonais est quasiment nulle, puisqu'elle représentait 2 000hl en 2020 sur le marché mondial (OIV, 2022).

3.5. Vignobles implantés dans de nouvelles zones d'opportunité

Dans cette configuration, basée sur l'exploitation de nouvelles zones d'opportunité, l'implantation des vignes est très récente. Même si la vigne a potentiellement été cultivée par le passé, cette culture et sa commercialisation ne s'inscrivent pas dans le patrimoine agricole et culturel de la région et il n'existe pas réellement de tradition viticole. Dans un contexte de changement climatique, certains territoires semblent bénéficier de conditions climatiques plus favorables pour la culture de la vigne. Ainsi, sur ces nouveaux territoires, la viticulture représente une culture minoritaire. La production est généralement tournée vers le biologique, et si quelques vins sont déjà produits, la vente s'effectue en circuit court et à échelle très locale. Les exemples les plus représentatifs de cette configuration sont situés en Suède sur les îles Öland et Götland, et en Bretagne avec les îles de Groix, Belle-île-en-mer, Yeu (Vendée) et à Quiberon, Sarzeau, Theix-Noyal pour les espaces littoraux.

Si en Bretagne le concept de « renaissance » du vignoble historique peut être mis en avant (Charmont *et al.*, 2020 ; Saindrenan, 2011), plusieurs études ont mis en lumière le futur potentiel pour la culture de la vigne (Bonnardot *et al.*, 2022 ; Bonnardot et Quéno, 2020 ; Petitjean *et al.*, 2022 ; Thibault *et al.*, 2022). L'implantation des vignobles et surtout la possibilité de commercialiser du vin breton est très récente. En effet, avant 2016, la réglementation n'autorisait pas la plantation de vignes à des fins commerciales sans indication géographique (Bonnardot et Quéno, 2020). Ainsi, si la vigne était un peu présente en Bretagne, l'implantation de vignobles à but commercial n'a été possible qu'à partir de 2016. A ce titre, l'un des premiers vignobles commerciaux de Bretagne a été implanté à Sarzeau en 2020. Les premières vendanges professionnelles ont eu lieu en 2022, et les premières bouteilles ont été commercialisées en 2023. Il est difficile de dire si l'implantation de cette nouvelle culture est bien perçue en Bretagne : certains vignobles sont bien acceptés par les locaux (Sarzeau), tandis que d'autres présentent plus d'opposition (Belle-île-en-mer par exemple). Si actuellement, il n'existe pas de cahier des charges autorisant ou interdisant la plantation de certains cépages, la stratégie des viticulteurs est très majoritairement axée autour d'un produit qualitatif et/ou représentatif du terroir local, que de produire en grande quantité. De même, l'ensemble des vignobles bretons commerciaux sont en agriculture biologique.



Figure 18 - Vignobles commerciaux bretons a) Sarzeau, b) Theix-Noyal, c) île de Groix, d) île d'Yeu
Crédits photos : Jeanne Thibault, Loïc Fournure et Google Images

En Suède, la production de vin à visée commerciale est également un phénomène récent. La Suède compte 330 exploitations viticoles mais seulement une douzaine détiennent une autorisation de production et de vente de vin (Rytkönen, 2013). Selon l'OIV, le pays dénombrait 106 ha de vignes pour une production comprise en 400-600 l/ha (Mårtensson *et al.*, 2013), soit un potentiel maximum de 636 hl. Les deux principales régions viticoles du pays sont situées sur les îles Öland et Gotland et font parties de la « *Swedish farming zone* », c'est-à-dire dans la zone présentant les conditions d'exploitation les plus favorables du pays (Rytkönen, 2013). La plupart de ces vignobles sont combinés à d'autres activités, soit agricoles, touristiques, magasins à la ferme, etc. A l'exception d'un vignoble d'Öland, tous les vignobles proposent des activités touristiques : hôtellerie, visite des vignes, parrainage et système d'abonnements à des vignes, etc. (Rytkönen, 2013). De la même manière que pour la Bretagne, l'activité étant relativement nouvelle, il est difficile d'avoir un réel retour sur la place de la viticulture dans l'économie ou l'activité touristique du pays. Pour autant, la stratégie des viticulteurs est de proposer un produit de qualité, plutôt qu'un produit de grande consommation. Comme le souligne Lasserre, ces vignobles du nord de l'Europe bénéficient de nuits plus froides mais également de plus d'heures d'ensoleillements (Lasserre, 2017) ; ces conditions leur permettent

d'obtenir des raisins de plus petites tailles, mais également plus aromatiques et un moût de raisin plus concentré (Mårtensson *et al.*, 2013). De manière générale, les vignobles relatifs à cette configuration sont récents, il est encore difficile d'avoir du recul quant à leur potentiel réel et aux économiques pour les régions concernées. Cependant, ils confortent l'idée que la culture de la vigne est désormais possible dans des conditions longtemps jugées « difficiles ».

3.6. Parcelles de vigne de petites tailles et non professionnelles

Si les configurations exposées précédemment concernent toutes des vignobles professionnels et ont donc une visée commerciale, il existe des parcelles de vignes gérées à titre privé et associatif. A l'inverse des vignobles professionnels, il est difficile d'estimer l'impact socio-économique de ces parcelles. Les propriétaires ou associations exploitant ces parcelles ont généralement à cœur de relancer une activité vitivinicole historique.

En Bretagne, la parcelle de vigne de l'île d'Arz est gérée par l'association In Vino VeritArz. Historiquement, la vigne est attestée sur l'île jusqu'au début du XIX^{ème} siècle. Les dernières vendanges enregistrées datent de 1916 sur l'île d'Ilur, et on retrouve aujourd'hui encore des ceps de vieilles vignes (Guinoiseau, 2014). Aujourd'hui, la parcelle de vignes plantée en 2017, s'étend à 100m de la mer sur 1000 m², partagé entre du pinot noir, du pinot blanc et du chenin (Figure 19). Si le statut associatif ne permet pas la commercialisation du vin, c'est bien l'idée de la promotion insulaire et du caractère historique viticole de l'île qui ont permis de concrétiser ce projet (Arz.fr).



Figure 19 - Parcelle de vignes de l'île d'Arz

Crédit photo : Jeanne Thibault

4. Conclusion de chapitre

La description des caractéristiques des vignobles littoraux et insulaires était une étape indispensable à la compréhension des singularités et des potentialités de ces espaces. D'un point de vue climatique, les spécificités propres à ces espaces semblent être des atouts majeurs dans un contexte de hausse des températures. La discontinuité terre-mer engendre des contrastes thermiques favorables au développement de brises littorales ; ces brises permettent, entre autres, une atténuation des températures extrêmes (Bonnardot *et al.*, 2005 ; Fourment *et al.*, 2014a, 2014b). Les fréquence et l'intensité des vagues de chaleur tout comme celle des jours de gels printaniers sont donc potentiellement moins importantes à proximité immédiate du littoral. De même, les différentes brises et le régime pluviométrique particulier des espaces littoraux et insulaires permettent de réduire le risque de maladies fongiques (Xyrafis *et al.*, 2021). Ces éléments sont autant de facteurs favorables à la viticulture, particulièrement dans un contexte de changement climatique. Dans cette optique, de nouveaux vignobles s'implantent dans de nombreuses zones côtières qui offrent des potentialités nouvelles pour la viticulture. Pour exemple, il est possible de citer la Bretagne (France), ou la Suède.

Cependant, la viticulture littorale et insulaire n'est pas une culture nouvelle. Au contraire, elle s'inscrit depuis de nombreuses années dans le paysage que ce soit avec une mise en valeur du caractère insulaire (Corse, Sardaigne, Grèce, etc.) ou de façon plus commerciale et intensive dans les îles-pays (Nouvelle-Zélande, Australie). L'ensemble de ces vignobles permettent d'avoir une vision assez large et variée des solutions d'adaptations possibles face aux changements climatiques à venir. En effet, qu'ils soient très normés comme en Australie ou en Nouvelle-Zélande, anciens et spécifiques comme à Lanzarote, Santorin ou Ténérife, les modes de gestion et de production s'adaptent aux conditions locales des sites (conditions climatiques, topographiques, économiques, touristiques, etc.).

Ainsi, si les espaces littoraux et insulaires peuvent être perçus comme des territoires d'avenir pour la viticulture, ils n'en restent pas moins des espaces fortement contraints : tourisme, logement, prix foncier, etc.). Dans des espaces où la disponibilité du foncier plus limitée et convoité, il convient de se demander quels espaces allouer à l'agriculture, et dans notre cas, plus particulièrement à la viticulture.

CONCLUSION PREMIERE PARTIE

Avec un réchauffement observé depuis les années 1980 (Bonnefoy *et al.*, 2010 ; Madelin *et al.*, 2010), la physiologie de la vigne semble déjà impactée dans de nombreuses régions viticoles (Jones, 2013 ; Jones *et al.*, 2012a, 2022 ; Schultz, 2008). Des modifications sont constatées sur les rendements, la composition des raisins ou encore sur les dates de vendanges (Seguin et Garcia de Cortazar, 2005 ; van Leeuwen *et al.*, 2019). Les stades phénologiques majeurs (débourrement, véraison, maturité) connaissent déjà une avancée de plusieurs jours dans la plupart des régions viticoles (Barbeau *et al.*, 2015 ; Bonnefoy *et al.*, 2010 ; Ramos et Jones, 2018 ; Seguin et Garcia de Cortazar, 2005 ; Sgubin *et al.*, 2019 ; van Leeuwen et Darriet, 2016), phénomène qui devrait s'accroître dans le futur (Naulleau *et al.*, 2022 ; Ollat et Touzard, 2020). Dans ce contexte, les viticulteurs tentent d'ores et déjà d'adapter leurs pratiques et leurs stratégies de production (Jones et Webb, 2010 ; Mosedale *et al.*, 2016) afin de préserver la qualité et la typicité de leurs vins. Au-delà des modifications propres aux vignes et aux baies, à plus long terme et à échelle plus large, le changement climatique représente également un enjeu pour la stabilité économique des régions viticoles traditionnelles (Schultz et Jones, 2010).

Ces nouveaux contextes climatiques questionnent la distribution spatiale future des vignobles. En effet, si les cartes d'aptitude à la viticulture démontrent une migration vers les pôles ainsi que vers les espaces plus proches du littoral (Figure 2), les configurations locales de ces espaces peuvent remettre en cause l'implantation ou l'expansion de la viticulture. En effet, la culture de la vigne n'étant pas qu'une conjonction de variables climatiques, de multiples contraintes économiques, environnementales, sociétales, d'implantation, etc. sont également à prendre en compte. Or, les espaces insulaires et côtiers sont des espaces fortement contraints : pression foncière, anthropique, touristique, vulnérabilité à l'érosion, conflits d'usage potentiels, etc.

Dans la perspective d'identifier des zones d'aptitude viticole pérennes dans un contexte de changement climatique, une démarche d'optimisation multiobjectifs capable d'intégrer les différents déterminants d'une viticulture durable semble pertinente. Au-delà d'une analyse du potentiel agroclimatique, l'optimisation permet de prendre en compte des objectifs et des contraintes de différentes natures.

PARTIE 2

MODELISATION SPATIALE ET MULTIOBJECTIFS DES VIGNOBLES POTENTIELS

Au vue des enjeux de l'adaptation de la viticulture au changement climatique et des questionnements liés à une possible relocalisation des vignobles dans certaines zones géographiques, il apparaît pertinent de développer une approche d'optimisation spatiale qui permette d'identifier les espaces les plus pertinents en fonction d'un ensemble de contraintes (biophysiques, agroclimatiques et anthropiques). En privilégiant une approche prospective, cette démarche vise à implémenter un modèle d'optimisation multiobjectifs qui soit en capacité de calculer, pour différents scénarios, les zones viticoles les plus favorables.

Pour bien comprendre les contraintes et les choix méthodologiques opérés, cette partie abordera successivement le domaine de l'optimisation à travers un état de l'art (CHAPITRE 3), et présentera le modèle MAUVE (Modélisation sUboptimale des Vignobles Emergents et existants) (CHAPITRE 4) développé au long de cette thèse.

CHAPITRE 3

La modélisation multiobjectifs

Ce troisième chapitre tend à poser les bases de l'optimisation multiobjectifs. Au travers d'un état de l'art bibliographique, les principes et la terminologie associés au domaine de l'optimisation seront exposés dans un premier point. Les spécificités de l'optimisation multiobjectifs et les concepts associés seront abordés dans un deuxième point. Enfin, une classification des méthodes d'optimisation multiobjectifs sera proposée, afin de mieux comprendre les choix opérés dans le chapitre suivant.

SOMMAIRE DE CHAPITRE

1. L'OPTIMISATION, PRINCIPES ET CONCEPTS	88
1.1. INTRODUCTION A L'OPTIMISATION.....	88
1.2. TERMINOLOGIE ET CONCEPTS DE BASE DE L'OPTIMISATION	89
1.3. L'OPTIMISATION MONO-OBJECTIF	91
2. LE PROBLEME D'OPTIMISATION MULTIOBJECTIFS.....	92
2.1. LE PRINCIPE DE L'OPTIMISATION MULTIOBJECTIFS	92
2.2. CONCEPTS ET DEFINITIONS DE L'OPTIMISATION MULTIOBJECTIFS, AU SENS DE PARETO.....	93
3. LES DIFFERENTES METHODES D'OPTIMISATION MULTIOBJECTIFS	95
3.1. LES PRINCIPALES METHODES D'OPTIMISATION MULTIOBJECTIFS.....	95
3.1.1. <i>Les méthodes scalaires</i>	95
3.1.2. <i>Les méthodes interactives</i>	97
3.1.3. <i>La logique floue</i>	98
3.1.4. <i>Les métaheuristiques</i>	99
3.1.5. <i>L'aide à la décision</i>	100
3.2. CLASSIFICATION PROCEDURALE DES METHODES D'OPTIMISATION	102
3.2.1. <i>La prise de décision</i>	102
3.2.2. <i>Le traitement des objectifs</i>	103
3.2.3. <i>La recherche des solutions</i>	105
4. CONCLUSION DE CHAPITRE.....	108

1. L'optimisation, principes et concepts

1.1. Introduction à l'optimisation

Au quotidien, des acteurs de différents secteurs d'activité (économistes, ingénieurs, industriels, décideurs, etc.) sont confrontés à des problèmes d'optimisation (Dréo *et al.*, 2006). En gestion de production, l'optimisation tend à trouver un équilibre entre les moyens matériels, humains, les consommables tout en assurant une quantité et qualité suffisante de produits finis. En ingénierie ou en informatique, l'objectif est plutôt de maximiser des performances en utilisant un minimum de temps et de ressources (Weise *et al.*, 2009). De manière générale, les domaines d'applications de l'optimisation sont divers et nombreux, à tel point qu'il est difficile d'en donner une définition exacte (Weise *et al.*, 2009).

Afin de pouvoir englober tous les secteurs d'activité, l'optimisation peut globalement se définir comme une approche visant à « *trouver les meilleures solutions à un problème donné* » (Weise *et al.*, 2009). Ces meilleures solutions font références à des objectifs définis en amont, et dont la traduction mathématique est couramment appelé fonction objectif. Dréo *et al.* expriment l'optimisation comme « *une (ou plusieurs) fonction objectif, ou fonction de coût, que l'on cherche à minimiser ou à maximiser vis-à-vis de tous les paramètres concernés* » (Dréo *et al.*, 2006). Ces minimisations et maximisations de coûts sont généralement supplées par des informations de contraintes qui viennent limiter les solutions possibles (Baudoui, 2012 ; Dréo *et al.*, 2006). Ainsi, afin d'obtenir les meilleures solutions au problème donné, les paramètres des solutions doivent satisfaire les objectifs fixés tout en prenant en compte les contraintes imposées. En ce sens, si l'on considère l'optimisation comme un outil d'aide à la décision, l'approche permet d'orienter le décideur vers un choix profitable (Baudoui, 2012).

1.2. Terminologie et concepts de base de l'optimisation

Bien qu'il existe différentes méthodes d'optimisation (Collette et Siarry, 2003 ; Dréo *et al.*, 2006 ; Weise *et al.*, 2009), une certaine terminologie –*exposée ci-après*– reste commune à l'ensemble de ces méthodes (Avila, 2006).

Définition 1 - Fonction objectif

Equation mathématique représentant ce que l'on souhaite améliorer, le but à atteindre. Une fonction objectif est notée $f()$.

Également appelé : critère d'optimisation, fonction coût, fonction d'adaptation

Définition 2 - Optimum

Suite au processus d'optimisation, représente le résultat optimal de la fonction objectif.

Également appelé : valeur optimale

Définition 3 - Paramètres

Variables de la fonction objectif, ajustées lors du processus d'optimisation afin d'obtenir une (ou plusieurs) solution(s) optimale(s).

Également appelé : variables d'optimisation, variables de conception, variable de décision

Définition 4 - Vecteur d'objectifs

Vecteur noté \vec{x} où $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$ regroupant l'ensemble des paramètres.

Définition 5 - Espace de recherche

Espace défini par l'ensemble des combinaisons possibles des valeurs des paramètres.

Également appelé : espace des paramètres, espace de décision

Définition 6 - Espace des objectifs

Espace défini par l'ensemble des combinaisons possibles des valeurs des fonctions objectifs.

Définition 7 - Contraintes

Conditions limitant et/ou interdisant certaines valeurs des espaces de recherches et/ou des objectifs. Ainsi, les conditions peuvent restreindre les paramètres dans l'espace de recherches (**DEFINITION 5**) ou les valeurs des fonctions objectifs de l'espace des objectifs (**DEFINITION 6**) (Avila, 2006).

Définition 8 - Domaine réalisable

Domaine de l'espace de recherche et de l'espace des objectifs, respectant l'ensemble des contraintes. Par opposition, le domaine non-réalisable ne respecte pas un ou plusieurs paramètres.

Également appelé : espace réalisable, espace admissible

Afin de mieux comprendre les relations entre l'espace de recherche, l'espace des objectifs et le domaine réalisable, un exemple ainsi qu'un schéma explicatif –*inspirés des travaux de Avila, 2006*– sont exposés. La Figure 20 illustre un problème à deux paramètres soumis à une contrainte d'intervalle (g_1 et g_2), et à deux objectifs soumis à une limite de contrainte (e_1). Afin d'exposer les grands principes de l'optimisation de manière générique, les optimums sont représentés sous forme d'aires graphiques, et non sous forme de graphiques à courbes.

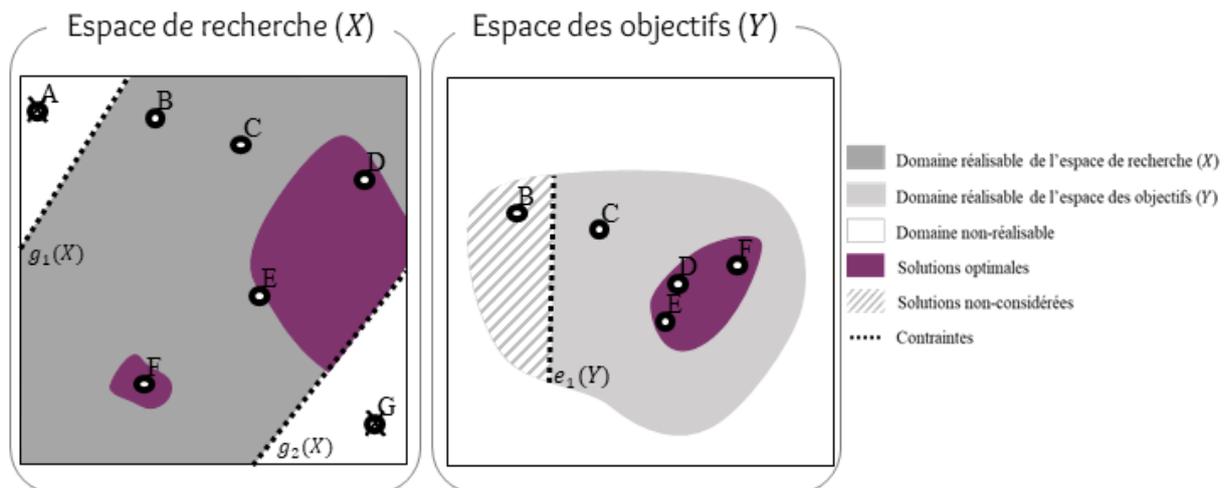


Figure 20 - Relations entre l'espace des recherches, l'espaces des objectifs et les solutions optimales
Adaptée de Avila, 2006

Comme le démontre la Figure 20, la correspondance entre une solution admissible de l'espace de recherche (X) et une solution admissible de l'espace des objectifs (Y) n'est pas toujours vraie. En effet, les contraintes inhérentes aux paramètres ($g_1(X)$ et $g_2(X)$ - Figure 20) incluent la solution B comme une solution appartenant au domaine réalisable de l'espace de recherche, alors que la contrainte inhérente aux objectifs ($e_1(Y)$ - Figure 20) exclue cette solution du domaine réalisable de l'espace des objectifs. Ainsi, la solution B est une solution « non-considérée » au vu des objectifs. De cette façon, nous constatons que les solutions respectant les contraintes des paramètres sont également soumises aux contraintes des objectifs.

1.3. L'optimisation mono-objectif

Avant-propos : dans un souci de simplification, seule la minimisation d'objectif est abordée dans ce point. Cependant, l'approche est identique dans le cas d'une maximisation d'objectif.

L'optimisation mono-objectif – ou *monocritère* – permet de représenter un problème ayant pour but de minimiser un unique objectif. Cette approche est composée d'une seule fonction objectif, mais peut comporter des contraintes. Dans le cadre d'une minimisation d'objectif, la solution avec la valeur de paramètres la plus petite est considérée comme optimale.

Si $x \vec{x} \in \mathbb{R}^n$ correspond au vecteur de paramètres n à ajuster pendant le processus d'optimisation, et $f(\cdot) : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ la fonction objectif permettant de mesurer les solutions \vec{x} et $\vec{e}(\vec{x})$ une limite de contrainte, alors le problème mono-objectif peut s'écrire :

Équation 1 - Formulation d'un problème mono-objectif

minimiser $y = f(x)$

sachant que $e(x) = (e_1(x), e_2(x), \dots, e_m(x)) \leq 0$

où $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$

et $y \in Y$

où x est le vecteur de paramètres, y le vecteur d'objectif, X l'espace de recherche et Y l'espace des objectifs

Mais couramment, la plupart des problèmes n'ont pas qu'un objectif à maximiser ou à minimiser, mais plusieurs à prendre en compte simultanément (Avila, 2006). Ces problèmes impliquant plusieurs fonctions objectifs, sont appelés « multiobjectifs » et nécessitent des techniques de résolutions particulières (Coello, 2006).

2. Le problème d'optimisation multiobjectifs

2.1. Le principe de l'optimisation multiobjectifs

Un problème d'optimisation multiobjectifs (POM) est un problème dont l'ensemble des objectifs doit être optimisé simultanément (Avila, 2006 ; Coello, 2000b). De la même façon que pour un problème mono-objectif, des contraintes d'intervalles ou de limites peuvent être imposées à un ou plusieurs objectifs (Coello, 2006). Ainsi, un POM inclut un ensemble de (k) fonctions objectifs, un ensemble de (n) paramètres et de (m) contraintes et peut s'écrire comme suit (Francisci, 2002):

Équation 2 - Formulation d'un problème multiobjectifs

minimiser $y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$

sachant que $e(x) = (e_1(x), e_2(x), \dots, e_m(x)) \leq 0$

où $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$

et $y = (y_1, y_2, \dots, y_k) \in Y$

où x est le vecteur de paramètres, y le vecteur d'objectifs, X l'espace de recherche et Y l'espace des objectifs (Francisci, 2002)

Communément dans un POM, les objectifs sont non-commensurables, c'est-à-dire que leurs unités de mesures sont différentes (Coello, 2000b), et sont généralement contradictoires ou concurrents (Collette et Siarry, 2003). Si dans le cas d'un problème mono-objectif, la meilleure décision est clairement définie comme le minimum (ou le maximum) d'une fonction, la décision est rarement aussi catégorique en multiobjectifs (Francisci, 2002 ; Srinivas et Deb, 1994). Par exemple, si un industriel souhaite augmenter la quantité produite, tout en minimisant ses coûts et en respectant une qualité minimale, quel est l'équilibre à avoir entre ces objectifs ?

La recherche de compromis est le principe de l'optimisation multiobjectifs (OM). Ainsi, en opposition à un problème mono-objectif, la résolution d'un POM ne comprend pas une unique solution optimale, mais plusieurs solutions représentant les différents compromis entre les objectifs (Avila, 2006 ; Coello, 2006).

2.2. Concepts et définitions de l'optimisation multiobjectifs, au sens de Pareto

Dans le cas d'un POM, l'ensemble des solutions représentant les compromis entre les objectifs est couramment appelé « *ensemble des solutions optimales de Pareto* » (Francisci, 2002). Dans certains ouvrages, l'ensemble peut aussi être appelé « *solutions non dominées* » ou « *solutions non inférieures* » (Coello, 2006 ; Dréo *et al.*, 2006 ; Srinivas et Deb, 1994). Une solution fait partie de ces optimums si l'amélioration d'un des objectifs n'entraîne pas la dégradation d'un autre. L'ensemble des vecteurs d'objectifs des solutions optimales forment le *front* ou la *frontière de Pareto* (Avila, 2006 ; Francisci, 2002).

Définition 9 - Optimalité de Pareto

Généralisée par l'économiste et sociologue Vilefredo Pareto à la fin du 19^e siècle. L'idée principale de l'optimalité de Pareto est qu'une société jouit d'une ophélimité (rapport de convenance) maximale s'il n'est pas possible d'améliorer la situation de quelqu'un sans dégrader celle d'un autre (The Luc, 2008).

Egalement appelée : optimum de Pareto

La **Figure 21** – inspirée des travaux de Francisci (2002) – représente un problème à deux fonctions objectifs (f_1 et f_2) où l'ensemble des solutions est représenté par les points de couleur mauve. Dans cet ensemble, les solutions sont indifférentes les unes des autres ; c'est-à-dire que sans un élément de préférence, une solution ne peut pas être considérée comme meilleure qu'une autre. Selon Srinivas et Deb (1994), les solutions de l'ensemble de Pareto sont « *supérieures* » aux autres solutions de l'espace de recherche lorsque tous les objectifs sont pris en compte, mais peuvent être « *inférieures* » aux autres solutions pour un (ou plusieurs) objectif(s). Ainsi, afin d'être considéré comme optimal au sens de Pareto, un point ne doit pas être dominé par un autre.

Définition 10 - Dominance de Pareto

Un point $x_1 \in X$ domine un point $x_2 \in X$ si x_1 est autant performant que x_2 sur l'ensemble des fonctions objectifs, et supérieur sur au moins l'une d'entre elles (Collette et Siarry, 2003 ; Dréo *et al.*, 2006).

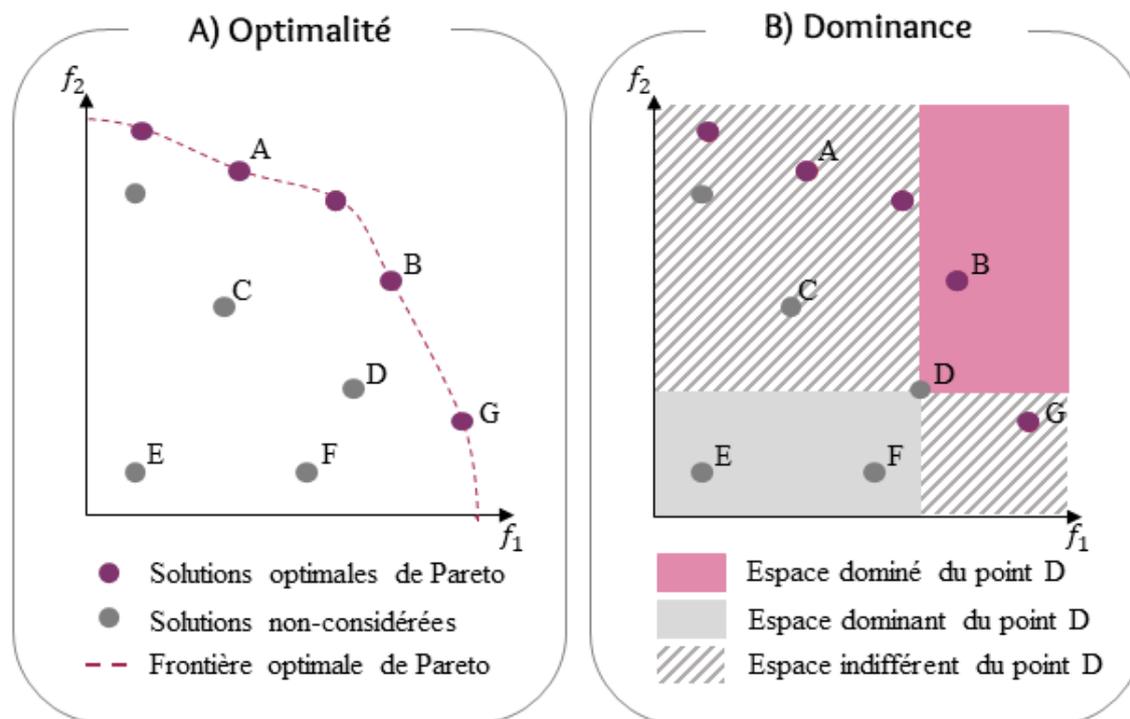


Figure 21 - Représentations de l'optimalité de Pareto à gauche, et notion de dominance de Pareto à droite

Source : Francisci, 2002

Sur la Figure 21 B, le point D fournit de meilleures performances f_1 et f_2 que les points E et F. Le point D domine donc E et F. Le point F domine également le point E puisqu'à performances équivalentes en f_2 , le point F est plus performant en f_1 . Ainsi, $D > F > E$. Le point B domine le point D, car il est plus performant sur les deux axes : $B > D$. En revanche, les points C et D sont indifférents entre eux : il n'est pas possible de dire que l'une des solutions soit plus performante que l'autre. Alors, on note $D \not> C$.

Bien que les points D et G soient indifférents et que le point G soit une solution optimale de Pareto, le point D est une solution dominée. En effet, le point B domine la solution D sur l'ensemble des fonctions objectifs, mais est indifférent avec le point G. Avec cette représentation, nous constatons que les solutions optimales dominent toutes les autres solutions, mais ne se dominant pas entre elles (Dréo *et al.*, 2006).

3. Les différentes méthodes d'optimisation multiobjectifs

3.1. Les principales méthodes d'optimisation multiobjectifs

Pour résoudre un POM, il existe diverses méthodes. Plusieurs études ont classifié ces méthodes en 5 grandes familles : les méthodes scalaires, interactives, floues, métaheuristiques et d'aides à la décision (Collette et Siarry, 2003 ; Francisci, 2008).

3.1.1. Les méthodes scalaires

Les méthodes scalaires permettent de transformer un POM en un problème d'optimisation mono-objectif, en fusionnant les différentes fonctions objectifs en une unique. Si les méthodes scalaires sont relativement simples à comprendre et à mettre en œuvre, leur utilisation peut avoir quelques inconvénients. En effet, les préférences de l'utilisateur étant définies en amont, l'utilisateur doit avoir une vue d'ensemble de la problématique, et en ce sens, être expert. Il est pourtant parfois difficile de définir au préalable une préférence plutôt qu'une autre (par exemple : devrais-je privilégier la qualité par rapport à la quantité ?). De plus, les solutions proposées sont orientées vers les préférences émises et des solutions potentiellement optimales sont écartées, sous couvert qu'elles ne correspondent pas aux exigences utilisateur. Cependant, si ces choix venaient à évoluer, l'ensemble du processus devrait être réitéré. Dès lors, si les méthodes scalaires permettent d'estimer assez simplement la surface de compromis, cette limite n'est perçue que d'un point de vue de référence (Collette et Siarry, 2003).

- **Pondération des fonctions objectifs** - *weighted-sum-of-objective-function* – Qualifiée d'approche naïve, cette méthode permet d'associer un poids à chaque fonction objectif définie. Les fonctions pondérées sont ensuite sommées pour n'obtenir qu'une seule et unique fonction objectif (Coello, 2000a ; Xiujuan et Zhongke, 2004). Facilement compréhensible et simple d'utilisation, cette méthode est notamment utilisée dans les domaines informatiques et économiques pour des analyses de ratio coûts/utilité (Amin et Zhang, 2014 ; Edeleva et Stennikov, 2019 ; Helff *et al.*, 2016 ; Jahanshahloo *et al.*, 2012).
- **Méthode « Keeney-Raiffa »** - Similaire à la méthode précédente, cette méthode utilise le produit des fonctions objectifs (fonction d'utilité) pour résoudre un problème d'optimisation mono-objectif (Abdellaoui et Gonzales, 2006 ; Francisci, 2008).

- **Méthode de la distance à un objectif de référence** - *distance-to-a-reference-objective* - Cette méthode transforme un POM en un problème d'optimisation mono-objectif en comparant chaque compromis de solutions en fonction de sa distance à une situation idéale, définie par l'utilisateur (Amin et Zhang, 2014 ; Collette et Siarry, 2003 ; Francisci, 2008).
- **Méthode ε -contraintes** – ou *méthode de compromis* - Pour cette méthode, un objectif prioritaire est conservé, les autres sont contraints (Xiujuan et Zhongke, 2004). L'initialisation commence par l'identification de la valeur extrême de cet objectif unique, grâce à des coefficients de contraintes sur les autres objectifs. Ces coefficients sont progressivement réduits, ce qui permet de parcourir l'ensemble de l'espace des objectifs (Glize, 2019). Le principe est illustré en Figure 22. De la même façon que pour les précédentes méthodes, la méthode du compromis est généralement utilisée pour des calculs de coûts (Edeleva et Stennikov, 2019 ; Hosny *et al.*, 2021 ; Vahidinasab et Jadid, 2010).

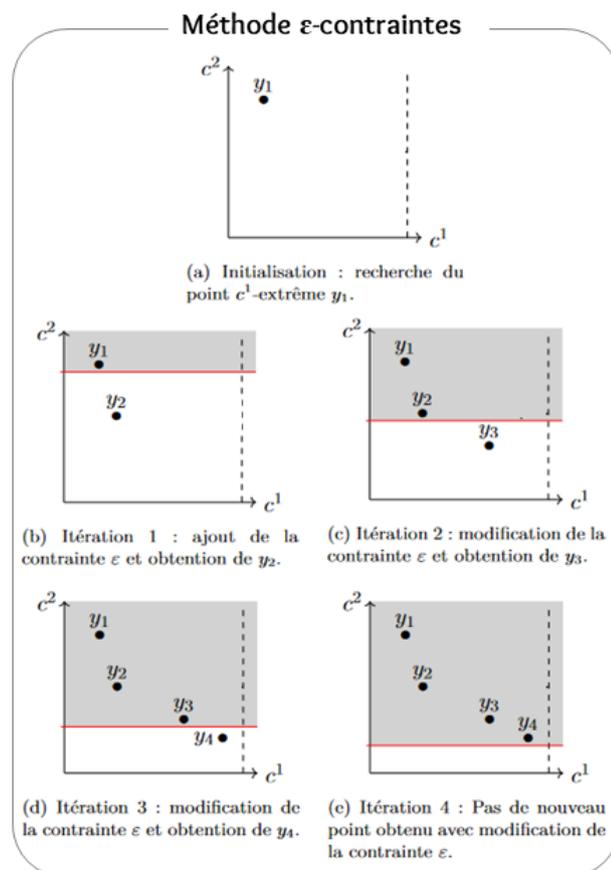


Figure 22 - Méthode ε -contraintes pour un problème à deux objectifs, où c_1 est un objectif à minimiser et c_2 l'objectif contraint par un coefficient. La ligne rouge représente l'ajout d'une contrainte sur l'objectif c_2

Source : Glize, 2019

- **Méthode du but à atteindre** – Après avoir défini une situation « idéale » pour l'ensemble des objectifs, la méthode tend à minimiser un coefficient scalaire représentant l'écart vis-à-vis de l'objectif fixé. Cette méthode est donc très dépendante du point de référence (Collette et Siarry, 2003 ; Francisci, 2008).
- **Méthode du but programmé** – Similaire à la méthode du but à atteindre, deux variables appelées « dérivations » sont ajoutées à chaque objectif. Le but est de minimiser l'écart entre ces deux dérivations, afin de se rapprocher au maximum de l'objectif initial (Francisci, 2008 ; Xiujuan et Zhongke, 2004).
- **Méthode lexicographique** – Plutôt que d'imaginer une situation idéale dès l'initialisation, les objectifs sont minimiser (ou maximiser) les uns après les autres, en prenant en compte au fur et à mesure, les différentes contraintes (AbdelAziz *et al.*, 2021 ; Pinchera *et al.*, 2017). Dans cette méthode, l'ordre des objectifs joue donc un rôle essentiel.

3.1.2. Les méthodes interactives

Les méthodes interactives permettent d'obtenir une unique solution à un POM. Ces méthodes permettent au décideur d'interagir constamment avec le processus : au fur et à mesure du processus d'optimisation, le décideur affine ses préférences vis-à-vis des fonctions objectifs. Les préférences émises permettent de faire des choix entre les différents objectifs, et permettent de n'obtenir qu'une unique solution en sortie.

- **Méthode du compromis par substitution** – *Surrogate-worth tradeoff*- Développée à l'origine pour résoudre un POM de ressources en eau (Haines et Hall, 1974), cette méthode reprend la méthode ϵ -contraintes, en ajoutant un processus itératif. Cette interaction permet de faire le lien entre le choix des décideurs et les solutions proposées par la méthode ϵ -contraintes (Dhillon et Kothari, 2000).
- **Méthode de Fandel** – Reprend le même principe que la somme des pondérations des fonctions objectifs, mais en rendant itératif le processus de recherche des poids. Elle permet de « guider l'utilisateur dans le choix de ses coefficients de pondération » (Francisci, 2008).
- **Méthode STEP** – Similaire à la méthode de Fandel, l'utilisateur intervient au fur et à mesure pour restreindre l'espace de recherche.
- **Méthode de Jahn** – L'utilisateur détermine un point de départ, puis exprime ses choix étape par étape, jusqu'à obtenir une solution optimale.

De manière générale, le principal inconvénient des méthodes interactives est l'approximation de la surface de compromis. En effet, en prenant en compte les préférences des utilisateurs au fur et à mesure de leurs exécutions, ces méthodes ne proposent qu'une seule solution, très orientée. Pour ces méthodes, il faut donc partir du postulat que la solution proposée est celle qui se rapproche le plus de la solution « idéale » ; or, cette hypothèse peut ne pas être vraie si tous les objectifs ne sont pas au maximum/minimum de leurs possibilités. La solution peut sembler idéale pour l'utilisateur, mais ne pas être le « compromis idéal » entre l'ensemble des objectifs. De même, la nécessité d'interagir constamment avec l'utilisateur pour borner l'espace de recherche, suppose une connaissance approfondie du problème par l'utilisateur.

3.1.3. La logique floue

Les méthodes de logique floue, ou *fuzzy logic*, permettent de traiter une part d'incertitude et d'imprécision dans les résultats. En effet, si la logique classique n'autorise que des paramètres binaires (vrai/faux, présence/absence, 0/1, etc.), la logique floue introduit un gradient, une « *transition progressive* » entre ces booléens (Collette et Siarry, 2003). Avec cette notion de gradient, l'incertitude dans les valeurs des objectifs peut être prise en compte (Reardon, 1998).

- **Méthode Sakawa** – Cette méthode utilise la logique de transition progressive sur les paramètres des objectifs et des contraintes (Carlsson et Fullér, 1994 ; Nasrabadi *et al.*, 2005). De même, les solutions proposées ont un « degré d'adhésion » avec les paramètres définis en amont, c'est-à-dire un niveau de corrélation variable avec l'objectif initial (Francisci, 2008).
- **Méthode de Reardon** – Développée par Reardon (Reardon, 1998), cette méthode repose sur le même principe que la méthode Sakawa bien qu'elle soit jugée moins complexe (Makubikua *et al.*, 2023). Ainsi, pour chaque paramètre définis en amont, une fonction d'appartenance appelée « *fonction d'appartenance de Reardon* » (ou *Reardon's membership function*) est définie.

3.1.4. Les métaheuristiques

Les métaheuristiques sont dédiées aux problèmes d'optimisation « difficile », et sont généralement présentées comme des concepts de la vie courante. Ces problèmes d'optimisation difficile sont tellement complexes que, dans la majorité des cas, il est compliqué de trouver la solution adaptée. En effet, la seule façon d'obtenir la solution optimale serait d'énumérer toutes les solutions possibles. Or, les capacités et les temps de calculs pour obtenir l'ensemble des solutions sont très chronophages (Widmer, 2001). Pour pallier ces inconvénients, les heuristiques ou métaheuristiques ont été proposées. Les méthodes heuristiques sont considérées comme des procédures « *exploitant au mieux la structure du problème considéré, dans le but de trouver une solution de qualité raisonnable en un temps de calcul aussi faible que possible* » (Widmer, 2001). En ce sens, si l'obtention d'une solution optimale n'est pas forcément garantie avec ces méthodes, les métaheuristiques permettent tout de même d'obtenir une solution satisfaisante avec des solutions de calcul (coûts, temps, logistiques) moins importants.

- **Recuit simulé** – Cette méthode s'appuie sur un concept métallurgique, le recuit, afin de trouver un minimum. Le recuit simulé reprend l'algorithme de Metropolis qui consiste à simuler l'évolution d'un système instable à un état d'équilibre grâce à une température (Bhanot, 1988). L'évolution est simulée grâce à une méthode de type Monte-Carlo et le recuit simulé ajoute un processus itératif à la démarche, afin de trouver la solution la plus adaptée (Francisci, 2008 ; Widmer, 2001).
- **Recherche Tabou** – Développée par F. Glover (Glover et Laguna, 1999), la recherche tabou peut être présentée comme une alternative au recuit simulé (Francisci, 2008). A partir d'une configuration initiale quelconque, les itérations permettent de se déplacer d'un voisin à un autre, en choisissant le « *moins mauvais* ». En gardant en mémoire les dernières solutions et en interdisant un retour en arrière vers celles-ci, la solution s'améliore au fur et à mesure des itérations (Gendreau et Potvin, 2014 ; Laguna, 2018).
- **Algorithmes génétiques** – Les algorithmes génétiques s'appuient principalement sur les principes de sélection de Darwin et de génétique de Mendel (Widmer, 2001). Les principaux avantages de ces approches résident dans la robustesse des solutions proposées et dans la recherche d'équilibre du ratio performances/coûts pour la survie de divers environnements. Les algorithmes génétiques, en travaillant sur une population de solutions, font référence aux principaux mécanismes de la sélection naturelle : la sélection, le croisement et la mutation. Par extension, le principe d'élitisme est ajouté à certaines méthodes.

3.1.5. L'aide à la décision

A l'inverse des quatre familles précédentes, les méthodes d'aide à la décision ne sont pas basées sur un principe de dominance (lexicographique ou de Pareto), mais sur une relation d'ordre entre les objectifs. Les méthodes les plus connues d'aide à la décision multicritères sont les méthodes ELECTRE et PROMETHEE (Maystre *et al.*, 1994).

- **ELECTRE** – Elimination ET Choix Traduisant la Réalité – Basée sur un principe de surclassement, la méthode ELECTRE a connue plusieurs extensions et variantes depuis sa création à la fin des années 1960 par Bernard ROY (Figueira *et al.*, 2010 ; Roy, 1968).
 - La méthode **ELECTRE I** pose le problème MO en terme de choix de la meilleure action. En ce sens, les actions sont « partitionnées » en deux catégories : les solutions sélectionnées qui sont incomparables entre elles, et les solutions éliminées qui sont des actions surclassées par des solutions de la première catégorie (Maystre *et al.*, 1994 ; Roy, 1991).
 - **ELECTRE II** reprend le principe de classement de la méthode originale, mais s'attache à classer les actions entre elles (de la meilleure à la moins bonne) plutôt que de trouver la « meilleure » solution (Maystre *et al.*, 1994).
 - **ELECTRE III** reprend le même principe qu'ELECTRE II, mais introduit une notion de flou dans le classement des solutions. Des « degrés de crédibilité de l'hypothèse de surclassement » sont attribués à chaque action, variant de 0 à 1 (Maystre *et al.*, 1994). Pour ce faire, deux seuils sont définis : un seuil d'indifférence et un seuil de préférence stricte (Collette et Siarry, 2003).
 - **ELECTRE IV** est inspiré d'ELECTRE III, mais ne nécessite pas l'attribution d'un poids à chaque critère (Collette et Siarry, 2003).
 - **ELECTRE I S** est une adaptation d'ELECTRE I à la logique floue. La partition en deux catégories est reprise, mais un gradient de flou est intégré aux solutions sélectionnées (Maystre *et al.*, 1994).
 - **ELECTRE TRI** permet de classer les actions en différentes catégories, qui sont séparées par des « actions de préférences ». Ainsi, chaque action est comparée aux actions de préférences (Collette et Siarry, 2003).

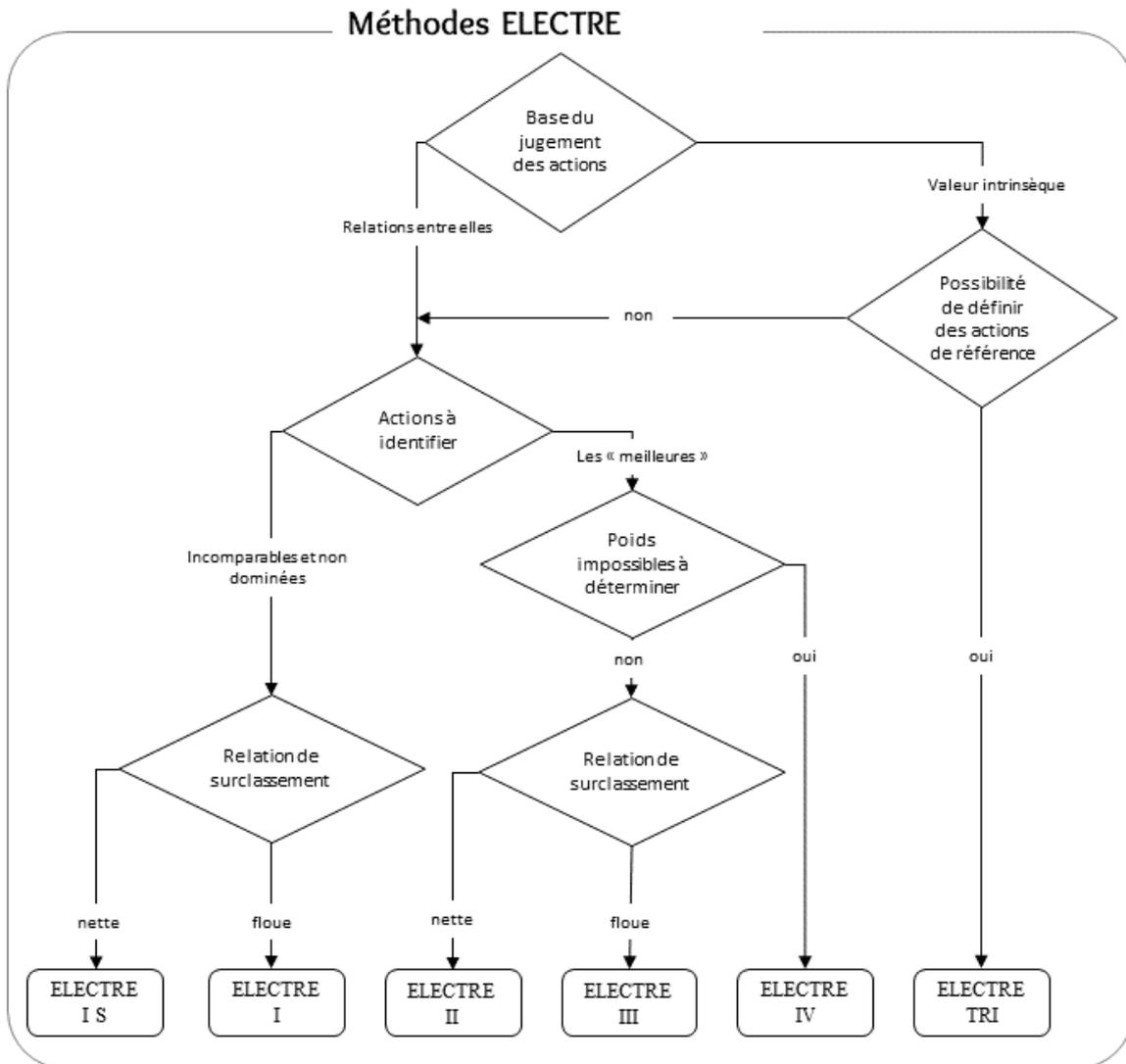


Figure 23 - Résumé graphique des méthodes ELECTRE

Source : Merad, 2010

- PROMETHEE** – Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations – Les méthodes PROMETHEE ont été développées par Jean Pierre BRANS au début des années 1980 (Brans et De Smet, 2016). Basées sur un principe de surclassement, les méthodes PROMETHEE permettent un rangement partiel (**PROMETHEE I**) ou complet (**PROMETHEE II**) (Boumedyen, 2017). Quelques années plus tard, **PROMETHEE-GAIA** (ou GAIA) est présentée comme une approche plus descriptive des méthodes PROMETHEE. Cette méthode permet d’identifier visuellement les conflits ou synergies entre les critères, et de comprendre les choix et compromis opérés pour prendre une décision (Brans et De Smet, 2016).

3.2. Classification procédurale des méthodes d'optimisation

Si la distinction par famille permet d'appréhender les différentes méthodes qui existent dans le domaine de l'optimisation, il est assez difficile de savoir quelle méthode choisir dans un cas particulier. Afin de mieux comprendre les choix opérés dans la méthode d'optimisation de cette thèse, une classification hiérarchique est proposée, inspirée de celle établie par Collette et Siarry (2003) et des distinctions opérées par Berro (2005). Cette classification permet de prendre en compte toutes les familles de méthodes évoquées, mais en décomposant différentes étapes du processus.

3.2.1. La prise de décision

La première question à se poser lors du choix de la méthode porte sur la connaissance que l'on a du problème : quelle est la connaissance de l'utilisateur sur le problème, et cette connaissance permet-elle d'affirmer des préférences sur les objectifs ? De ces questions découlent trois premières catégories : les méthodes *a priori*, *a posteriori* et *progressive*. Cette distinction permet de positionner la prise de décision dans le processus d'optimisation.

- **Les méthodes a priori**

Pour les méthodes *a priori*, le compromis entre les différents objectifs doit être spécifié avant l'exécution du processus d'optimisation. En sortie, une solution unique reflète le compromis opéré en amont. En ce sens, l'utilisateur doit avoir une bonne connaissance du problème afin d'émettre des préférences sur les fonctions objectifs. Ces méthodes ont l'avantage de n'effectuer qu'une seule recherche pour proposer une solution, et la résolution d'un POM est généralement rapide. Cependant, la modélisation et l'implémentation des préférences émises par le décideur peuvent être complexes. De plus, les préférences étant émises avant le processus, rien n'empêche le décideur de ne pas être satisfait de la décision, ou de changer ses préférences. Si tel est le cas, l'intégralité du processus (implémentation et modélisation des préférences, processus d'optimisation) doit être exécutée une nouvelle fois.

- **Les méthodes progressives**

Concernant les méthodes *progressives*, les interactions entre le décideur et le processus d'optimisation sont constantes. En effet, durant l'ensemble du processus d'optimisation, le décideur doit émettre ses préférences afin de réorienter la recherche de solutions vers des espaces plus adaptés aux compromis évoqués. Ces méthodes sont intéressantes puisque le

décideur est concrètement intégré à la démarche d'optimisation, mais elles nécessitent un nombre d'interactions important avec le modélisateur. Cette procédure alourdit considérablement le processus d'optimisation et rend complexe la mise en œuvre effective de des méthodes progressives.

- **Les méthodes a posteriori**

L'intérêt des méthodes *a posteriori* est de proposer, à la fin du processus d'optimisation, un ensemble de solutions regroupant différents compromis entre les objectifs. Ainsi, le décideur peut émettre ses préférences sur les solutions, c'est-à-dire en aval du processus d'optimisation et sans a priori sur les résultats. L'un des avantages majeurs de ces méthodes réside dans la non-formulation des préférences en amont du modèle, et la non-nécessité d'avoir recours à un décideur en cours de simulation. En ce sens, ces méthodes exigent des connaissances et des préférences moins précises du problème initial, en comparaison aux méthodes *progressives* ou *a priori*. Cependant, le processus d'optimisation de ces méthodes est généralement plus long que celui des méthodes *a priori*, puisqu'il faut apprécier plusieurs espaces d'objectifs avec différentes contraintes.

3.2.2. Le traitement des objectifs

Après avoir exposé la façon dont peut être traitée la prise de décision, il convient de différencier les différentes méthodes de traitement des fonctions objectifs. Pour cela, trois méthodes peuvent être mises en œuvre : les méthodes agrégatives, les non-agrégatives non-Pareto et les méthodes non-agrégatives Pareto (Berro, 2005).

- **Les méthodes agrégatives**

Les méthodes agrégatives consistent à transformer un POM en un problème mono-objectif (Collette et Siarry, 2003 ; Piegay, 2015). Ces méthodes permettent de transformer le vecteur objectif en un produit scalaire (Francisci, 2002). Les plus connues sont la pondération des fonctions objectifs, la méthode ϵ -contraintes ou encore le but programmé (cf. 3.1.13.1.1). L'ensemble de ces méthodes repose sur le principe suivant : le décideur essaie inconsciemment de maximiser un vecteur d'objectif (Berro, 2005). Ainsi, les méthodes agrégatives nécessitent la formulation de préférences sur les différents objectifs, avant le processus de recherche. Ces préférences sont traduites par des pondérations d'objectifs lors de la transformation du vecteur d'objectifs en une unique fonction objectif. Ainsi, la solution obtenue par l'agrégation des fonctions objectifs est nettement dépendante des vecteurs de poids utilisés pendant la

scalarisation (Srinivas et Deb, 1994). Le choix d'une solution étant conditionnée en amont du processus d'optimisation, le traitement des objectifs par une méthode agrégative est généralement apparenté à des prises de décision *a priori* (Collette et Siarry, 2003 ; Piegay, 2015). Ainsi, bien que la recherche de solution soit rapide, la modélisation des préférences du décideur peut être complexe. De plus, en cas de solution non satisfaisante pour le décideur ou si les préférences changent, l'implémentation de nouvelles préférences (souvent *chronophage*) et le processus de recherche doivent être réitérés.

▪ Les méthodes non-agrégatives et non-Pareto

Les méthodes non-agrégatives permettent de « *traiter le POM de manière vectorielle, c'est-à-dire sans effectuer une agrégation des fonctions objectifs* » (Collette et Siarry, 2003). Ainsi, les méthodes non-agrégatives et non-Pareto n'agrègent pas les fonctions objectives mais traitent séparément les objectifs (Berro, 2005). Les méthodes non-agrégatives et non-Pareto les plus couramment utilisées sont la méthode lexicographique (Coello, 2000a ; Francisci, 2008) et Verification through Genetic Algorithm (VEGA) (Corno *et al.*, 1998). La méthode lexicographique permet d'optimiser les différentes fonctions objectifs dans un ordre prédéfini, alors que VEGA optimise chacun des objectifs indépendamment les uns des autres (Collette et Siarry, 2003 ; Corno *et al.*, 1998 ; Piegay, 2015). Les méthodes non-agrégatives et non-Pareto sont généralement critiquées à cause de leur non prise en compte de l'optimalité et de la dominance de Pareto qui occasionne un manque de diversité au sein des solutions proposées (Srinivas et Deb, 1994). En effet, en ne prenant pas en compte ces principes de Pareto, le risque d'obtenir un ensemble « moyen » par rapport aux fonctions objectifs est plus important. Selon plusieurs auteurs (Collette et Siarry, 2003 ; Srinivas et Deb, 1994) l'obtention de solutions concentrées autour d'un point médiocre est élevée, ce qui ne permet pas une bonne estimation du front de compromis.

▪ Les méthodes non-agrégatives et Pareto

A l'inverse, les méthodes non-agrégatives et Pareto prennent en compte les principes d'optimalité et de dominance de Pareto, et autorisent un traitement des objectifs en simultané (Piegay, 2015). Ce processus permet une recherche qui satisfasse au mieux les différents objectifs (Berro, 2005). Les méthodes non-agrégatives et Pareto fournissent un ensemble de solutions représentant des compromis entre les différents objectifs. Elles sont ainsi assimilées à des prises de décisions *a posteriori*, puisque le choix de « la solution », parmi l'ensemble des compromis, est laissé à l'appréciation du décideur à la fin du processus de recherche.

3.2.3. La recherche des solutions

Après avoir proposé des méthodes de traitements des objectifs associées aux différentes modalités de prise de décision, il convient d'exposer les deux méthodes de recherche de solutions : les méthodes non-élitistes et les méthodes élitistes.

▪ Les méthodes non élitistes

Les méthodes non-élitistes n'ont pas d'archivage externe des solutions non-dominées et ne peuvent donc pas comparer les solutions d'une itération à une autre. On reproche souvent à ces méthodes, le manque de diversité au sein des solutions proposées (Berro, 2005 ; Collette et Siarry, 2003). Afin de pallier cette limite, un *sharing* est généralement implémenté afin de conserver une répartition uniforme sur la surface de compromis.

Définition 11 - Sharing

Principe développé par Goldberg et Richardson (1987) permettant d'éviter le regroupement des solutions autour d'un même point, dans le but de conserver une certaine diversité de solutions. Le *sharing* tend à modifier la note d'une solution, proportionnellement à son isolement (Mabed *et al.*, 2001). En ce sens, une solution avec une notation moyenne située dans une zone peu peuplée de l'espace des solutions sera privilégiée à une solution avec une meilleure note située en zone plus peuplée de ce même espace (Berro, 2005).

Autrement appelée : heuristique de partage, fonction de partage (plus rares)

Définition 12 - Efficacité

Résumé de la fonction objectif permettant de traduire la proximité d'une solution par rapport aux objectifs visés ; plus la valeur numérique de l'efficacité est faible, meilleure est la solution (Costa-Carrapiço *et al.*, 2020 ; Qiao et Yang, 2019).

Autrement appelée : fitness

Dans les méthodes non-élitistes prenant en compte les principes de Pareto, les algorithmes les plus connus sont MOGA, NSGA ou encore NGPA, trois algorithmes génétiques.

- **MOGA** – *Multi-Objective Genetic Algorithm* – Présentée par Fonseca et Fleming (1993) ou par Collette et Siarry (2003), MOGA est basé sur le principe de notation, un « rang » est attribué à chaque solution en fonction du nombre d'individus qui le dominant. Plus le rang s'approche de 1, plus l'individu domine des solutions (Berro, 2008 ; Francisci, 2008).
- **NSGA** – *Non dominated Sorting Genetic Algorithm* – Développée par Srinivas et Deb, la méthode reprend le principe de notation comme MOGA, mais le calcul de l'efficacité d'une solution diffère (Srinivas et Deb, 1994). En effet, le calcul de l'efficacité de chaque individu s'effectue en séparant la population en fonction des degrés de domination au sens de Pareto (Berro, 2008).
- **NGPA** – *Niched Pareto Genetic Algorithm* – Développé par Horn *et al.*, l'algorithme ressemble à NSGA, à ceci près que le processus de sélection inhérent aux algorithmes génétique diffère (Collette et Siarry, 2003 ; Horn *et al.*, 1994).

Les critiques les plus courantes sur ce type de méthode concerne le *sharing* et notamment la complexité de son paramétrage (Benyoucef et Xie, 2011 ; Deb *et al.*, 2000). De même, les résultats de ces méthodes sont fortement dépendants de ce paramétrage. En effet, puisque cette technique accentue l'efficacité des solutions en espace de faible densité, les solutions de plus forte densité ne sont pas forcément correctement représentées (Berro, 2005).

▪ Les méthodes élitistes

Les méthodes élitistes permettent de conserver au moins une solution avec la meilleure *efficacité* à chaque itération du processus d'optimisation. Ces solutions, non dominées, sont stockées dans une archive externe (Collette et Siarry, 2003) qui permet d'assurer la préservation des « bonnes » solutions (Chatelain *et al.*, 2007). Elles sont restituées à chaque nouvelle itération afin de calculer l'*efficacité* de chaque solution, par rapport aux solutions stockées dans l'archive (Berro, 2005 ; Dhaenens, 2005).

L'ensemble des solutions archivées participe au processus de sélection de nouvelles solutions (Dhaenens, 2005). A chaque boucle du processus d'optimisation, une nouvelle solution optimale peut dominer toutes les solutions stockées ; pour cette raison, l'archive est mise à jour à chaque itération (Dhaenens, 2005). En ce sens, les méthodes élitistes permettent d'assurer une bonne diversité des solutions optimales et une meilleure estimation du front de Pareto que les méthodes non élitistes (Berro, 2005 ; Chatelain *et al.*, 2007 ; Dhaenens, 2005 ; Srinivas et Deb, 1994). Dans les méthodes d'optimisation élitistes les plus connues, il est possible de citer PAES

comme une méthode d'évolution, ou SPEA, PESA ou encore NSGA II comme algorithmes génétiques utilisant les principes de Pareto.

- **PAES** – *Pareto Archived Evolution Strategy* – Développée par Knowles et Corne, cette méthode est identifiée comme une stratégie d'évolution (Knowles et Corne, 1999). La recherche de solution s'effectue à partir d'un individu (et non d'une population) en comparaison avec une archive externe. Afin de maintenir une certaine diversité de solutions, l'espace des objectifs est divisé par un maillage en hyper-cubes permettant de déterminer la densité d'individus : les zones à faible densité de solutions sont favorisées, au détriment des zones à plus forte densité (Khare, 2002).
- **SPEA** – *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* – Développé par Zitzler et Thiele, les solutions non-dominées sont stockées dans une archive externe (Zitzler et Thiele, 1998). Afin préserver une certaine diversité au sein de la population, l'efficacité des individus de l'archive est proportionnelle au nombre d'individus dominés (Berro, 2008 ; Collette et Siarry, 2003 ; Khare, 2002).
- **PESA** – *Pareto Envelope-based Selection Algorithm* – Cet algorithme a également été développé par Corne (Corne et al., 2000). La méthode reprend le même découpage de l'espace des objectifs par hyper-cubes que PAES, mais reprend les principes de sélection et de mutation des algorithmes génétiques (Corne et al., 2000 ; Khare, 2002).
- **NSGA II** – *Non dominated Sorted Genetic Algorithm II* – Afin de palier l'utilisation du sharing et du manque d'élitisme de la première méthode, Deb et al. ont développé NSGA-II comme une extension de NSGA (Deb et al., 2000).

4. Conclusion de chapitre

Si les problèmes d'optimisation multiobjectifs sont courants dans la vie quotidienne, ils n'en restent pas moins des problèmes relativement complexes à résoudre. Au premier abord la diversité de méthodes proposées (méthodes scalaires, interactives, floues, métaheuristiques ou aide à la décision) peut paraître très large, mais la connaissance de l'utilisateur sur le problème peut influencer le choix de la méthode. En effet, il est possible de chercher une solution unique si l'utilisateur possède une connaissance suffisamment experte et exhaustive du problème (*méthodes a priori*), d'affiner les préférences et exigences de l'utilisateur en cours de simulation (*méthodes progressives*) ou de proposer un ensemble de solutions si l'utilisateur n'émet pas de préférences sur l'un des objectifs et/ou s'il souhaite faire le choix entre plusieurs propositions (*méthode a posteriori*).

Si la connaissance du problème par l'utilisateur permet d'orienter plus ou moins le choix d'une méthode, la façon dont vont être traité les différents objectifs est également à prendre en compte. Les méthodes agrégeant les fonctions objectifs en une unique fonction sont apparentées aux méthodes a priori, puisqu'elles nécessitent l'expression des préférences de l'utilisateur (*méthodes agrégatives*). Les méthodes n'agrégeant pas les fonctions objectifs permettent de traiter les objectifs de façon individuelle (*méthodes non-agrégatives et non-Pareto*) ou simultanée (*méthodes non-agrégatives et Pareto*). Si l'ordre de traitement des objectifs est important dans les méthodes non-agrégatives et non Pareto, les méthodes non-agrégatives et Pareto sont généralement plus chronophages et parfois plus complexes à mettre en œuvre. La façon dont vont être traitées les solutions peut être un facteur déterminant dans le choix d'une méthode. Ainsi, il est généralement mentionné que les méthodes non-élitistes sont complexes à paramétrer et en parallèle, que les méthodes élitistes permettent de mieux déterminer les solutions optimales d'un POM.

Enfin, si l'OM permet de résoudre des problèmes complexes, les algorithmes présentés n'intègrent pas de composante spatialisée. Or, dans des problématiques "géographiques", cette composante est un élément non négligeable. En effet, si les données géographiques possèdent une composante spatialisée (vectorielle ou matricielle), les problématiques associées peuvent également prendre en compte l'aspect spatial (localisation spécifique, espaces protégés, soucis de morcellement ou de corridors écologiques, etc.). Afin d'identifier les espaces les plus adaptés à la viticulture dans un contexte de changement climatique, il convient de considérer l'ensemble des interactions entre facteurs abiotiques, biotiques et anthropiques (Neethling, 2016). Dans cette perspective, une démarche d'optimisation s'avère intéressante.

CHAPITRE 4

Modélisation de l'Adaptation sUboptimale des Vignobles Emergents et existants : le modèle MAUVE

Ce quatrième chapitre présente le modèle développé tout au long de la thèse : MAUVE pour Modélisation de l'Adaptation sUboptimale des Vignobles Emergents et existants. Dans un premier temps, la structuration générale du modèle sera exposée, puis dans un deuxième temps, les données d'entrée seront mises en avant et discutées. Enfin, le fonctionnement détaillé du modèle sera expliqué en troisième et dernier point de ce chapitre.

SOMMAIRE DE CHAPITRE

1. GENERALITES DE MAUVE	110
1.1. INTRODUCTION AU MODELE	110
1.2. STRUCTURATION GENERALE ET DEFINITIONS DU MODELE	111
2. LES DONNEES D'ENTREE DU MODELE	114
2.1. LES DONNEES CLIMATIQUES.....	114
2.2. LES DONNEES BIOPHYSIQUES	118
3. FONCTIONNEMENT DU MODELE	119
3.1. DEFINITION D'UN SCENARIO	119
3.1.1. Import des données climatiques, et résolution de la zone d'étude	120
3.1.2. Sélection des variétés à implanter	121
3.1.3. Définitions des contraintes	123
3.1.4. Définition des objectifs.....	125
3.2. ETAPE D'INITIALISATION	127
3.3. LA SIMULATION	128
3.3.1. Phénologie et occurrences de vulnérabilité relatives aux objectifs	130
3.3.2. Sélection des solutions suboptimales.....	133
3.4. LES SORTIES DU MODELE.....	134
4. CONCLUSION DE CHAPITRE.....	136

1. Généralités de MAUVE

1.1. Introduction au modèle

Afin de déterminer les impacts du changement climatique sur la viticulture, il convient d'identifier les espaces les plus favorables à la culture de la vigne dans les années à venir. Dans cette perspective, une démarche d'optimisation multiobjectifs s'avère pertinente. En effet, les objectifs d'un viticulteur ou d'un planificateur peuvent être de nature diverses voire contradictoires (productivité, qualité, impact environnemental, insertion paysagère etc.), d'autant que des contraintes (spatiales, réglementaires, environnementales, économiques, etc.) doivent être prises en considération. Cependant, une démarche d'optimisation « pure » nécessite la recherche des valeurs inhérentes aux objectifs ; or, dans notre étude, les minimisations/maximisations d'objectifs sont relatives à des données climatiques (minimisation d'événements extrêmes pour la vigne, recherche de maturité, etc.). La recherche des valeurs des objectifs n'a pas de sens, puisque ces valeurs sont existantes. Pour autant, les aspects relatifs à la prise de décision, aux traitements des objectifs ainsi qu'à la recherche de solutions sont pertinents pour notre étude.

Inspiré d'une démarche d'optimisation multiobjectifs de type pareto, le modèle développé au cours de cette thèse calcule différentes solutions d'implantation spatiale, en fonction de différents objectifs et contraintes. En sortie de modèle, il n'existe pas de solution unique, puisqu'en présence de plusieurs objectifs, il n'existe pas –ou rarement- une solution qui puisse satisfaire l'ensemble des critères (Srinivas et Deb, 1994). MAUVE (Modélisation de l'Adaptation sUboptimale des Vignobles Emergents et existants) a été pensé pour conduire des approches scénarisées. La prise de décision s'apparente à celle des méthodes *a posteriori* : l'utilisateur construit un scénario en intégrant divers objectifs et contraintes, mais n'émet pas implicitement de préférences. Les solutions proposées en sortie permettent à l'utilisateur de faire un choix entre plusieurs compromis, sans pour autant devoir relancer l'intégralité du processus.

Dans l'optique de préserver la multiplicité des objectifs et de pouvoir conserver l'ensemble des solutions satisfaisantes au regard du scénario implémenté, l'approche retenue n'agrège pas les objectifs en une fonction mono-objectif. Les objectifs sont traités simultanément afin de ne pas induire un système de hiérarchisation des objectifs. En ce sens, le traitement des objectifs de MAUVE peut être apparenté aux méthodes non-agrégatives.

Enfin, le caractère élitiste de certaines méthodes d'optimisation est intéressant pour ne conserver que les solutions les plus adaptées. Le principe de comparaison avec une archive a donc été intégré dans MAUVE, notamment dans la phase d'initialisation. Le modèle compare l'ensemble des valeurs du domaine réalisable, et ne retient que les meilleures. Ces valeurs servent ensuite de références lors de la phase de simulation du modèle.

1.2. Structuration générale et définitions du modèle

Le modèle MAUVE a été entièrement implémenté en langage R. Deux raisons principales ont motivé ce choix. D'une part, R est un environnement de programmation gratuit, open-source, offrant une importante librairie de méthodes et bibliothèques d'objets facilement intégrables dans un code de calcul. D'autre part la grande communauté d'utilisateurs permet d'améliorer régulièrement les performances de ces outils. La diversité des packages proposés ont ainsi permis de développer un modèle qui combine des propriétés spatiales (intégration des vecteurs spatiaux et de notions de voisinage, possibilité d'intégrer des notions de contiguïté, de compacité, etc.) et des imbrications d'échelles temporelles (pas de temps quotidiens, annuels, décennaux, etc.).

MAUVE a été conçu dans la perspective de tester différentes hypothèses d'implantation viticole (zone d'implantation, choix de cépages, contraintes physiques, agronomiques, etc.) en fonction d'un ou plusieurs scénarios incluant différentes projections du changement climatique. Il s'agit ainsi d'identifier des espaces suboptimaux pour l'implantation d'une activité viticole en fonction de plusieurs objectifs et contraintes fixés par l'utilisateur. Il s'agit d'un modèle dirigé par les données et donc fortement dépendant des paramètres implémentés. La démarche de modélisation est structurée en 3 étapes majeures : la scénarisation, l'initialisation et la simulation (Figure 24).

L'étape de scénarisation permet de définir la zone d'étude, le modèle et le scénario climatique, la période de simulation, le ou les cépages souhaités et la durée d'implantation associée. C'est également lors de cette première étape que des contraintes et des objectifs vont être formulés. Comme défini lors du Chapitre 3, une contrainte est une condition qui va limiter ou exclure certaines solutions (Définition 1, Définition 7) comme, par exemple, l'interdiction d'implanter une activité sur un espace urbain, privilégier certains espaces, etc. En parallèle, un objectif représente un but à atteindre à l'aide d'une maximisation ou d'une minimisation, comme

chercher à maximiser la qualité d'un produit, minimiser des coûts financiers, minimiser des risques climatiques, etc. Pour chaque objectif, des seuils d'acceptabilité et des limites sont définis. En dessous du seuil d'acceptabilité, l'objectif est considéré comme atteint et à l'inverse, au-delà du seuil limite, l'objectif n'est pas rempli et la solution est exclue.

Ensuite, l'étape d'initialisation permet de charger l'ensemble des données nécessaire au modèle, et d'exclure les mailles de la zone d'étude ne correspondant pas aux contraintes fixées en amont. Durant cette phase, les différentes solutions sont évaluées en fonction des objectifs définis par le scénario, puis classifiées. Les évaluations de l'ensemble des meilleures solutions sont archivées, et permettent de définir le domaine réalisable.

Enfin, la phase de simulation calcule les solutions de chaque maille, au regard des objectifs et des contraintes fixées dans le scénario, à un pas de temps annuel. Chaque solution est comparée aux valeurs de l'archive afin de déterminer son « admissibilité » au regard de l'ensemble des valeurs acceptables. En sortie du modèle, les solutions possibles sont proposées maille par maille, à un pas de temps annuel.

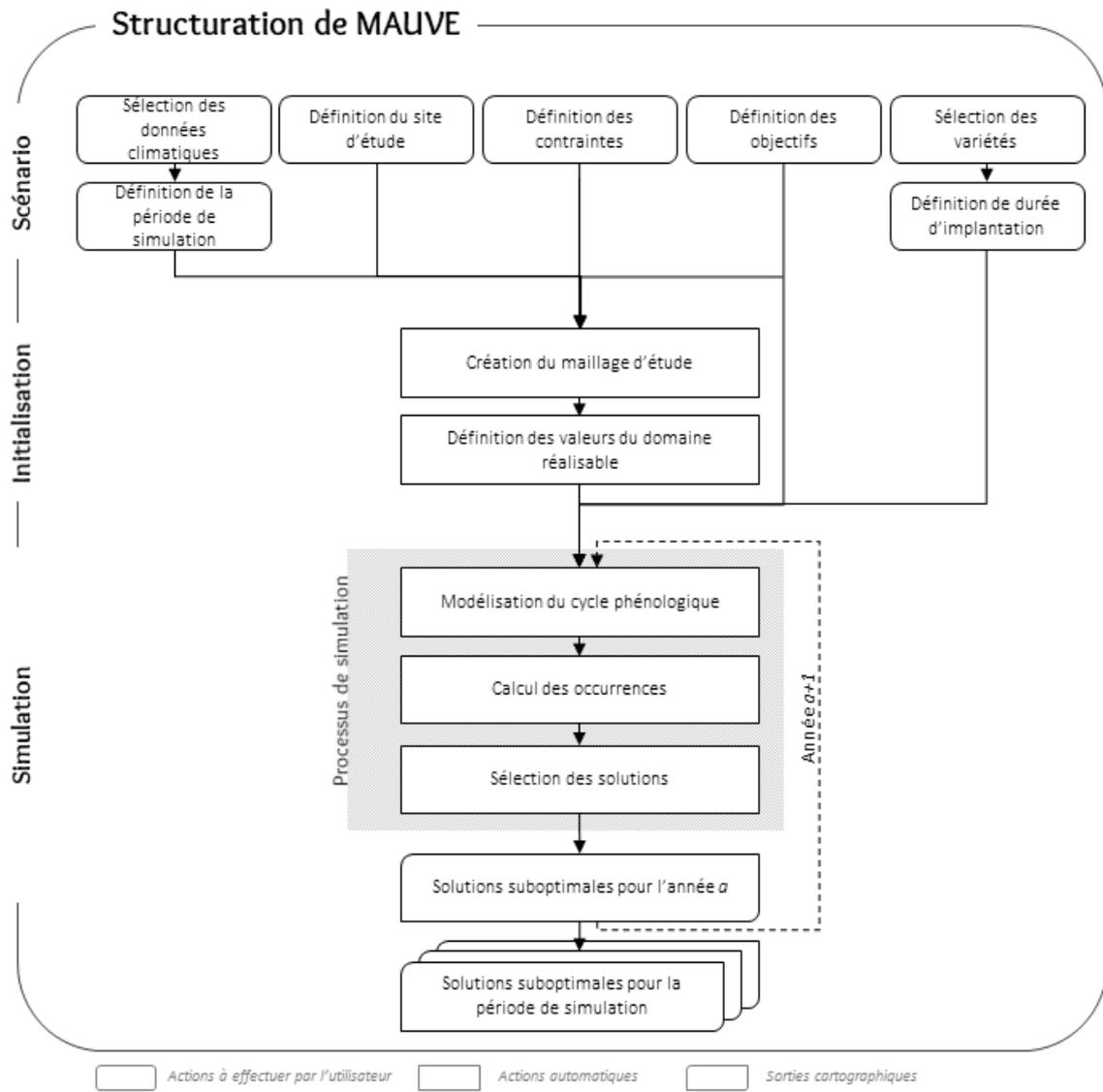


Figure 24 - Structuration générale du modèle MAUVE

2. Les données d'entrée du modèle

2.1. Les données climatiques

Afin de suivre l'évolution de la vigne et de mieux comprendre des projections possibles pour différents scénarios de changement climatique, le modèle MAUVE prend en compte différents modèles climatiques. L'ensemble des données est structuré en base de données relationnelle, ce qui rend l'utilisation de MAUVE possible sur différents systèmes d'exploitation. La base de données relationnelle est organisée en différentes tables (données organisées en lignes et colonnes) interrogeables grâce au langage de requête SQL (Structured Query Language). Elle répertorie les projections de changement climatique disponibles pour la zone d'expérimentation considérée : une table correspond à un modèle et un scénario de changement climatique (Figure 25). Le choix du modèle et du scénario associé est effectué durant l'étape de scénarisation, par l'utilisateur.

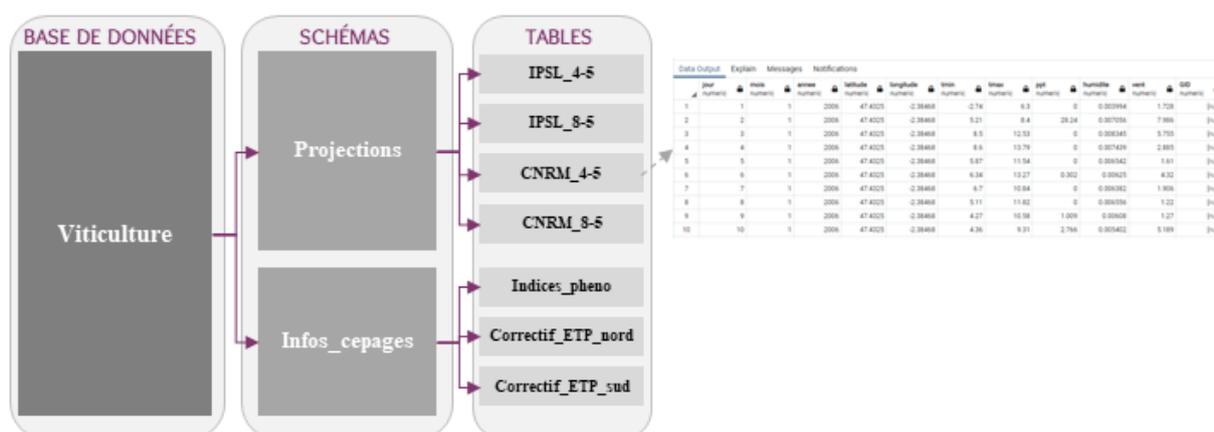


Figure 25 - Structuration de la base de données de MAUVE

Les modèles climatiques sont des représentations simplifiées des mécanismes de circulation atmosphérique entre la surface du sol et l'atmosphère. Ces modèles globaux prennent en compte des forçages naturels et anthropiques qui sont des éléments clés pour les simulations climatiques (Quénol *et al.*, 2021). Les concentrations de gaz à effet de serre (GES) étant fortement dépendantes des populations (démographie, production alimentaire, déchets, urbanisation, etc.) (Doelman *et al.*, 2018) et les variations climatiques n'étant pas entièrement prévisibles par les modèles, il semble difficile d'envisager un unique scénario de changement climatique. De ce constat, plusieurs scénarios ont été formalisés, permettant d'intégrer de multiples variations anthropiques comme la démographie, les politiques agricoles et environnementales, etc. Ces

variations agissent directement sur les milieux environnementaux, et de fait, sur le système climatique (Doelman *et al.*, 2018 ; Le Roux, 2017 ; Moss *et al.*, 2010).

Ainsi, les Shared Socio-Economic Pathways (SSP) sont des cadres de scénarisation traduisant plusieurs hypothèses socio-économiques à venir (Braconnot *et al.*, 2019 ; Doelman *et al.*, 2018 ; QuénoI *et al.*, 2021) Les SSP sont constitués de cinq narratifs issus du projet CIMP6 (Coupled Model Intercomparaison Project), construits suite aux discussions du GIEC (Braconnot *et al.*, 2019) (Groupement intergouvernemental d'expert sur le climat). Ainsi, les SSP1 et SSP5 envisagent des investissements dans les systèmes d'éducation et de la santé ainsi qu'une croissance économique rapide. Si le SSP5 suppose une économie basée sur des combustibles fossiles, le SSP1 tend sur une évolution vers des énergies plus durables. Les SSP3 et SSP4 sont plus pessimistes au sens où la démographie est plus rapide et peu d'investissements sont mis en place dans les systèmes d'éducation et de santé. Avec le SSP3 les pays privilégient la sécurité régionale, tandis qu'avec le SSP4, les inégalités entre pays se creusent. Enfin, le SSP2 est un scénario socio-économique intermédiaire à tous les narratifs (Figure 26).

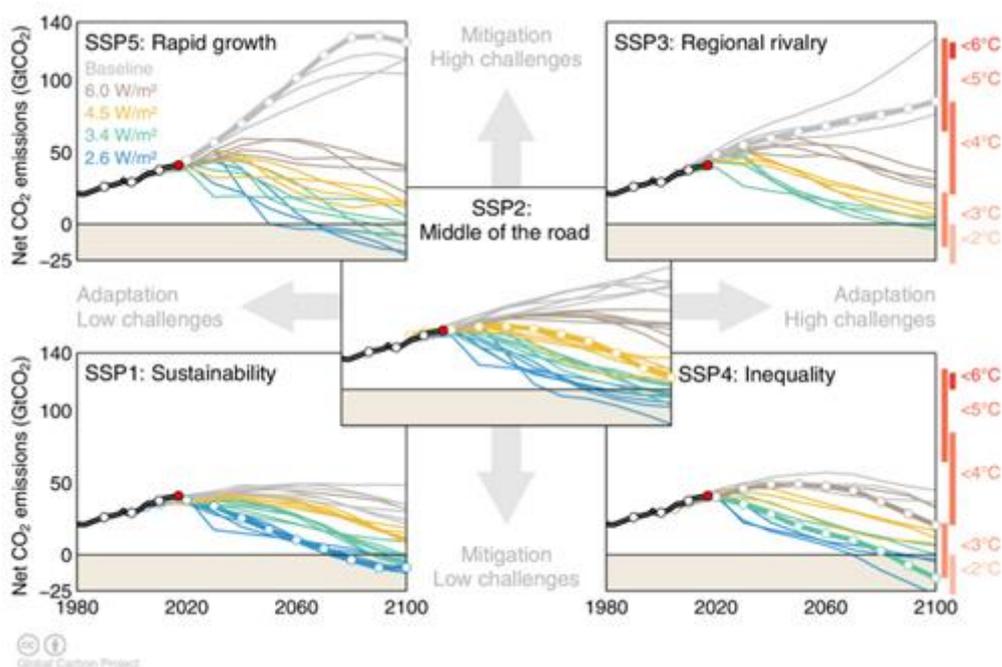


Figure 26 – Représentation des trajectoires socio-économiques des SSP

Source : Lepousez and Aboukrat, 2022

Les SSP peuvent être couplés avec des objectifs d'atténuation des émissions de GES à long terme. Ces objectifs d'atténuation sont traduits par les *Representative Concentration Pathway* (RCP) et le couplage des SSP et RCP permet d'apprécier diverses stratégies de politique climatique (Braconnot *et al.*, 2019 ; Doelman *et al.*, 2018). Les RCP sont des scénarios issus du projet CMIP-5 pour l'évaluation des sorties de modèles de circulation générale océan-atmosphère (Le Roux, 2017 ; Quénot *et al.*, 2021) créés suite aux discussions du GIEC et représentent les potentielles évolutions d'émission de gaz à effet de serre (GES) (Moss *et al.*, 2010). Les RCP traduisent plusieurs futurs possibles, en prenant en compte différents niveaux de population, différentes stratégies industrielles et systèmes énergétiques, et de potentielles politiques nationales et internationales (Quénot *et al.*, 2021). Quatre scénarios sont généralement retenus, allant du plus « optimiste » au plus « pessimiste » (IPCC, 2014 ; Moss *et al.*, 2010) (Tableau 11, Figure 27).

RCP	Type de scénario	GES	Projections des températures (2081-2100) **
RCP2.6	Scénario d'atténuation avec des efforts stricts pour limiter les émissions	Réduction rapide des émissions de GES grâce mise en place d'une politique de limitation	Augmentation de 0.3°C à 1.8°C
RCP4.5	Scénario intermédiaire avec des efforts pour limiter les émissions	Identique au RCP2.6 mais la mise en place d'une politique de limitation et le déclin des GES est plus tardif (2040)	Augmentation de 1.1°C à 2.6°C
RCP6.0	Scénario intermédiaire sans effort pour limiter les émissions	Augmentation des émissions de GES jusqu'en 2080, puis déclin	Augmentation de 1.4°C à 3.1°C
RCP8.5	Scénario avec fortes émissions	Accroissement des émissions de GES jusqu'en 2100	Augmentation de 2.6°C à 4.8°C

** Augmentation des températures moyennes sur l'ensemble du globe, comparées à la période 1986-2005

Tableau 11 - Résumé des différents RCP

Source : IPCC, 2014

A l'aide du Tableau 11, il est aisé de constater les écarts de températures entre les différents scénarios. Les températures énoncées ne sont que des moyennes effectuées sur l'ensemble des surfaces maritimes et terrestres, or l'augmentation attendue n'est pas uniforme sur l'ensemble du globe. En effet, pour l'ensemble des scénarios, un réchauffement plus important est attendu pour l'hémisphère nord, et plus spécifiquement au pôle nord (Figure 27).

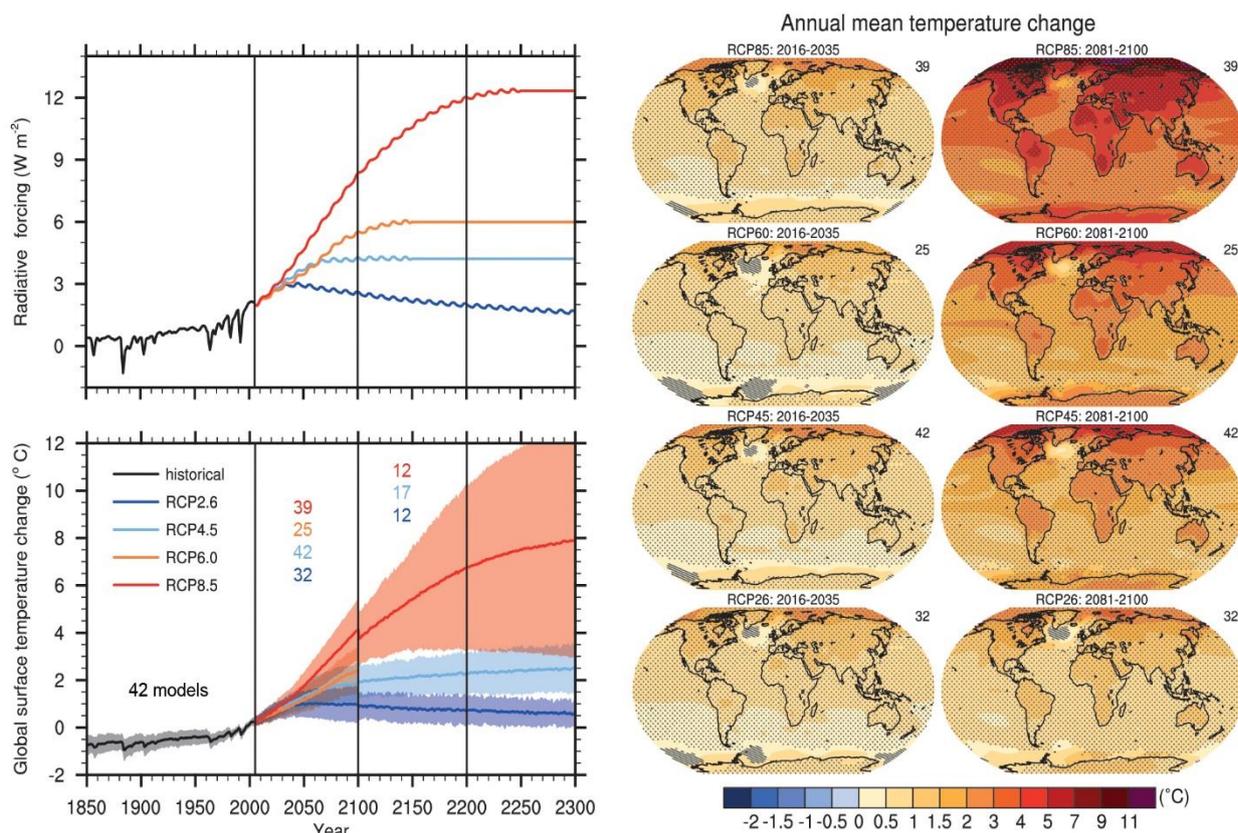


Figure 27 - Evolution des températures moyennes selon les RCP

Source : IPCC, 2013

2.2. Les données biophysiques

Des informations de structure et d'occupation de sols (OS) sont intégrées dans MAUVE afin d'exclure les espaces non adaptés aux usages viticoles. La plupart des données d'OS sont issues d'observations terrains ou d'imagerie satellitaire. Le principal inconvénient des bases de données terrains est la localisation parfois approximative des entités géographiques (Hubert-Moy *et al.*, 2019a). De même, l'utilisation de ces données vectorielles est généralement limitée à quelques classes d'OS spécifiques et ne couvre pas l'ensemble d'un territoire. Ainsi, afin de pouvoir couvrir des espaces plus importants, les données terrains sont généralement utilisées conjointement à l'imagerie satellite (Hubert-Moy *et al.*, 2019b). Les données issues de la télédétection sont produites grâce à des observations répétées d'un territoire. A échelle européenne, l'inventaire biophysique de l'occupation des sols Corine Land Cover (CLC) est produit par photo-interprétation à échelle 1 :100 000. Réactualisée tous les 6 ans grâce aux images satellites des constellations Landsat ou Sentinel, cette couche matricielle est établie selon une nomenclature en 44 classes répartie dans 5 grandes familles d'OS : surfaces artificielles, surfaces agricoles, forêts et espaces semi-naturels, zones humides et surfaces en eau (Annexe 4).

A échelle européenne, les données de sol renseignent les « Unités Cartographiques des Sols » (UCS) c'est-à-dire sur les caractéristiques de composition et de répartition de la couverture pédologique (Binard, 2000). Chaque UCS est composée d'au moins une « Unité Typologiques des Sols » (UTS) qui contient différentes données qualitatives et quantitatives sur la composition et les caractéristiques des différentes strates du sol (Binard, 2000). Le Centre européen de données sur les sols (European Soil Data Centre, ESDAC) a été créé en 2006 afin de fournir des données homogènes sur les sols aux différents états membres de l'Union Européenne (Panagos *et al.*, 2022). L'European soil database (ESDB) sont des données libres d'accès regroupent 73 attributs différents sur les sols : classification du sol, texture, couverture du sol, couche imperméable, altitude, pente, propriétés hydrologiques, etc. Disponibles depuis 2006 à échelle 1 :1 000 000, ces données sont une « *représentation simplifiée de la diversité et de la variabilité spatiale de la couverture pédologique en Eurasie* » (Panagos *et al.*, 2022).

Ces bases de données d'amplitudes européenne fournissent des données pertinentes pour des applications à méso-échelle. Les résolutions proposées sont cohérentes avec celles des modèles climatiques régionalisés qui proposent des sorties entre 25 et 8 km de résolution. A micro-

échelle des données plus précises peuvent être mobilisées (cartes des sols, plans locaux d'urbanismes...).

3. Fonctionnement du modèle

3.1. Définition d'un scénario

Dans le modèle MAUVE, l'étape de scénarisation est un préalable indispensable à toute simulation. Elle permet de choisir le modèle climatique et le scénario souhaités, de définir la ou les variétés à optimiser ainsi que les contraintes et les objectifs de l'expérimentation (Figure 28).

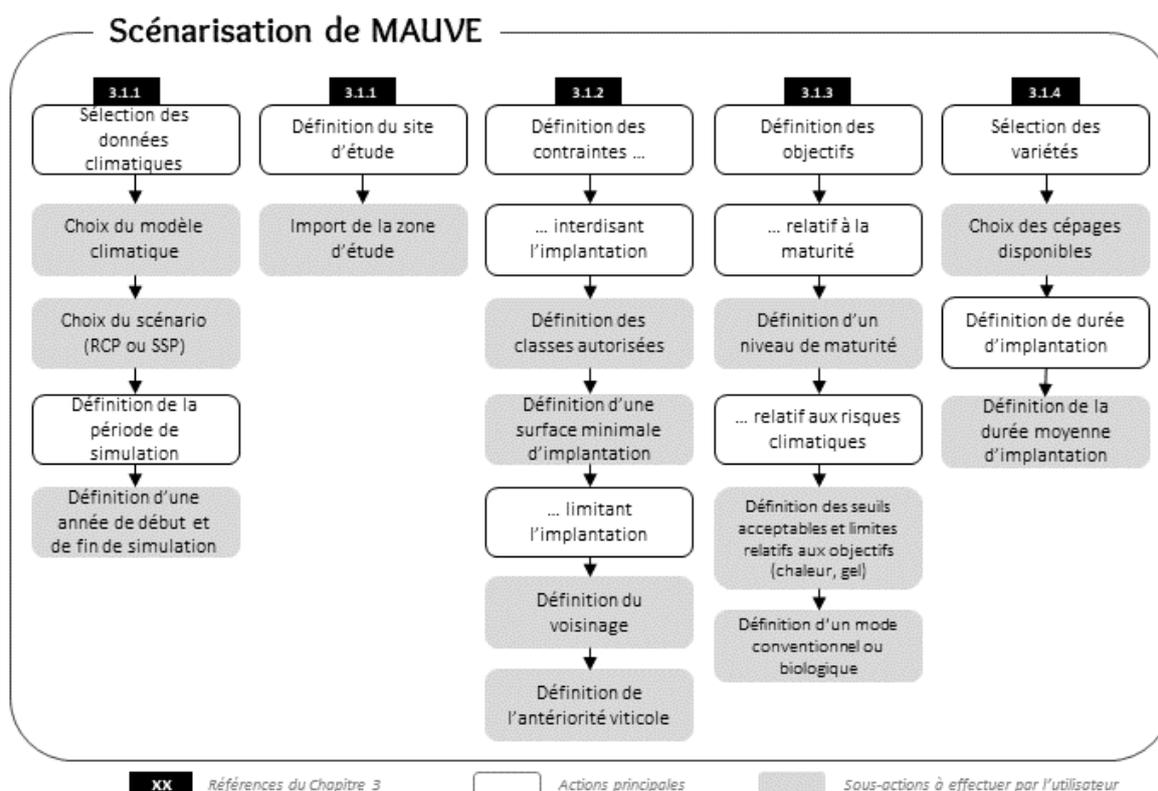


Figure 28 - Etapes de scénarisation du modèle MAUVE

3.1.1. Import des données climatiques, et résolution de la zone d'étude

En modélisation climatique, la planète est représentée grâce à une grille tridimensionnelle découpée en mailles. Estimés grâce aux modèles globaux, les paramètres climatiques (températures, humidité, précipitations, vitesse et direction du vent) sont résolus, dans un premier temps, à 100-150km. Cependant, les études d'impacts du changement climatique aux échelles régionale et locale ont recours à des résolutions plus fines. Des méthodes de réduction d'échelles sont utilisées pour affiner la résolution spatiale des modèles (Quénol *et al.*, 2021). En fonctionnant sur un système de grilles imbriquées (Figure 29), la réduction d'échelle dynamique permet d'obtenir une résolution d'une dizaine de kilomètres (Quénol *et al.*, 2021).

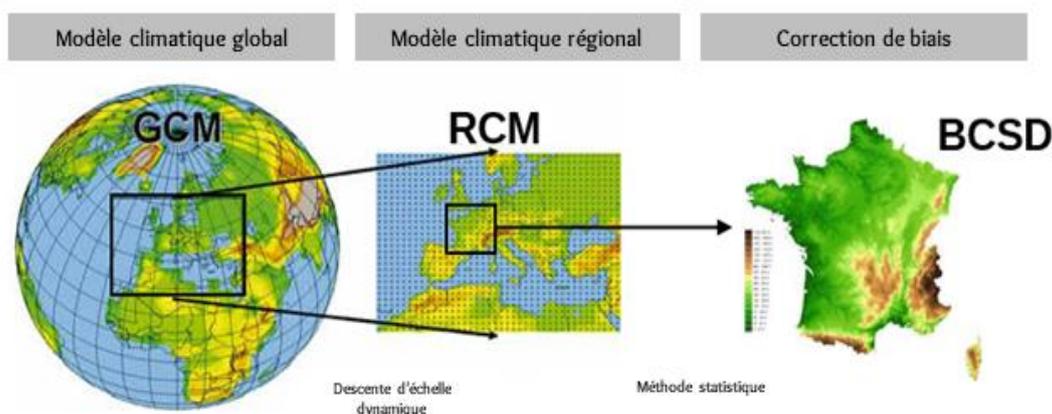


Figure 29 - Descente d'échelle, d'un modèle global à l'échelle régionale

Source : Quénol *et al.*, 2021

Ainsi, le projet mondial CORDEX (COordinated Regional Downscaling Experiment) vise à « renforcer la coordination des initiatives de réduction d'échelle des prévisions climatologiques au niveau régionale » (Whitehall *et al.*, 2012). L'objectif principal du programme est la production de projections du changement climatique à échelle régionale, sur l'ensemble du globe. En Europe, grâce au sous-programme EURO-CORDEX, les projections de changement climatique pour les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 sont disponibles à une résolution de 12 km (Jacob *et al.*, 2014 ; Quénol *et al.*, 2021 ; Soubeyroux *et al.*, 2020). Les données météorologiques sont modélisées à pas de temps journaliers, entre 1971 et 2100 (Jacob *et al.*, 2014).

Dans le modèle MAUVE, l'intégration de plusieurs modèles régionalisés et de différents scénarios de changement climatique en base de données permet à l'utilisateur de tester plusieurs hypothèses. L'utilisateur doit donc définir le modèle climatique et le scénario envisagés (SSP ou RCP en fonction des disponibilités), ainsi que la période de simulation. Bien que la zone d'étude soit définie par l'usager avec l'importation d'une couche d'information géographique, la résolution des simulations et des sorties est dépendante de celle des données climatiques. Autrement dit, la maille du modèle climatique choisi fixe la résolution de l'ensemble des données mobilisées.

3.1.2. Sélection des variétés à planter

Dans l'étape de scénarisation, l'utilisateur doit définir la ou les variété.s potentielle.s à planter. Afin de pouvoir identifier les espaces les plus favorables à la viticulture, une étape importante du modèle a été le développement d'une base de données relative à la phénologie de différents cépages. La classification de Baggiolini (Baggiolini, 1952) a été utilisée pour avoir une classification commune à tous les stades phénologiques. Cette classification permet de résumer le cycle actif de la vigne en 16 stades, annotés de A à P (Bonnefoy, 2013) (Figure 30).

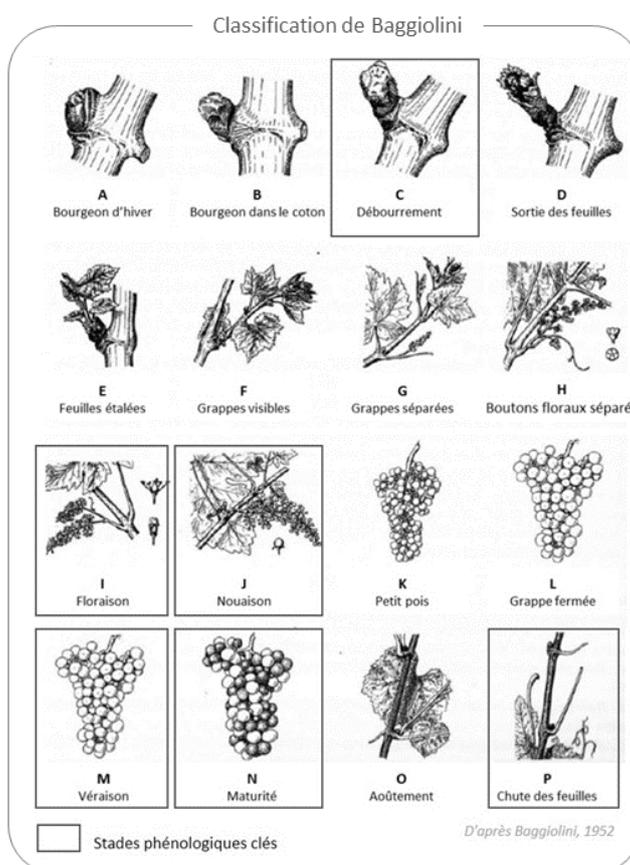


Figure 30 - Classification des stades phénologiques de la vigne selon Baggiolini

Plusieurs études ont démontré que les principaux stades phénologiques de la vigne sont corrélés avec une accumulation des températures (Duchêne et Schneider, 2005 ; Parker *et al.*, 2011, 2020a, 2020b ; van Leeuwen *et al.*, 2008). Ainsi, grâce à une bibliographie approfondie sur différents indices bioclimatiques, les stades principaux (débourrement, floraison, véraison et maturité technique) de plusieurs cépages ont été renseignés (Parker *et al.*, 2011, 2013 ; Quénot *et al.*, 2014 ; Tissot *et al.*, 2014, 2020 ; van Leeuwen *et al.*, 2008 ; Winkler, 1974) (Tableau 12).

Cépage	Stade	GDD*	Huglin	GFV**	GSR170***	GSRxxx	GSR220***
Pinot noir	C	57	-	-	-	-	-
	I	-	-	1219	-	-	-
	M	-	1700	2511	-	-	-
	N	-	-	-	2695	...	2933

* GDD = Growing Degree Days,

** GFV = Grapevine Flowering Véraison,

*** GSR = Grapevine Sugar Ripeness

Tableau 12 - Exemple des relations indices bioclimatiques/stades phénologiques pour le Pinot noir ; stades phénologiques C : débourrement, I : floraison, M : véraison, N : maturité

Si actuellement 16 cépages (5 blancs et 11 rouges) sont implémentés en base de données, il est possible de prendre en compte d'autres cépages documentés en bibliographie (Parker *et al.*, 2013, 2020). A ce stade, l'utilisateur peut choisir autant de variétés qu'il souhaite. En fin de processus, si l'utilisateur choisit plusieurs variétés, le modèle fournit des résultats optimisés par cépage (maille la plus adaptée à ce cépage) et entre cépage (cépage le plus adapté à une maille donnée).

Après avoir déterminé le.s cépage.s à planter, l'utilisateur définit la période d'implantation, c'est-à-dire la durée pendant laquelle une maille est exploitée. Par défaut, cette valeur est fixée à 30 ans, ce qui correspond à la durée d'exploitation moyenne d'un cep de vigne.

3.1.3. Définitions des contraintes

Les contraintes pour l'implantation de la vigne doivent être spécifiées dans l'étape de scénarisation. Comme mentionné précédemment, le modèle MAUVE intègre des contraintes excluant la culture de la vigne et des contraintes limitantes.

Les **contraintes n'autorisant pas l'implantation de la viticulture** sont relatives à l'occupation et à la structure des sols. Dans le cadre de l'identification des espaces adaptés à la vigne, la première contrainte d'implantation peut être relative à l'occupation du sol. Grâce à des données d'OS intégrées au modèle (cf. [2.2 Les données biophysiques](#)), l'utilisateur peut spécifier, dans l'étape de scénarisation, pour quelle.s classe.s la culture de la vigne est autorisée (surfaces agricoles, forêts et espace semi-naturels, etc.). L'utilisateur définit également la surface minimale que ces classes doivent représenter à l'échelle d'une maille climatique.

L'aspect drainant d'un sol est également un facteur important pour la viticulture, et représente une seconde contrainte dans MAUVE. En effet, sur des sols bien drainés, un stress hydrique permet des concentrations en sucre, en anthocyanes et en composés phénoliques plus importantes ([van Leeuwen et Seguin, 1994](#)) et la production de grappes moins généreuses mais de meilleure qualité ([Lazcano et al., 2020](#) ; [van Leeuwen et Seguin, 1994](#)). A l'inverse, un apport en eau excessif encourage la vigueur de la vigne et peut avoir des effets négatifs sur le plan œnologique ([van Leeuwen et Seguin, 1994](#) ; [Lazcano et al., 2020](#)). Plusieurs catégories de drainage allant de « sol à drainage excessif » à « sol submergé » sont donc prises en compte. A l'instar de l'occupation du sol, l'utilisateur détermine le.s classe.s souhaitée.s, ainsi qu'une surface minimale pour laquelle l'implantation est envisageable.

Actuellement, l'occupation de sol et les informations de sols sont traitées de façon binaire (espace adapté/espace non adapté). Cependant, il est tout à fait possible de filtrer l'espace en fonction de différents niveaux (pleinement, moyennement, peu, pas du tout adapté, etc.), ou d'imaginer la création de zones tampons autour de points d'intérêts.

Les **contraintes limitantes pour l'implantation de la vigne** sont relatives au voisinage d'une maille et à son antériorité viticole. Le voisinage entre les mailles permet de gérer des notions de compacité ou de contiguïté afin de privilégier des solutions adjacentes et ainsi, ne pas morceler l'espace. Au sein du maillage, les relations de contiguïté entre les différentes mailles sont gérées par défaut selon le principe de la contiguïté de Queen (Figure 31). Cette contiguïté se caractérise par deux régions voisines partageant au moins une frontière commune, aussi courte soit-elle ([A.WidiP et al., 2013](#)). Si besoin, l'utilisateur peut privilégier la contiguïté selon

le principe de Rook ou de Bishop (Figure 31), en le spécifiant dans le scénario. L'utilisateur spécifie également le degré de voisinage à envisager, allant de 0 (non prise en compte du voisinage), jusqu'aux voisins de rang n . Pour ces relations de voisinage, le choix d'utiliser une structure matricielle se justifie par le temps de calcul et la ressource en mémoire. En effet, importer directement des objets spatiaux requiert des ressources informatiques conséquentes, et les temps de calculs sont beaucoup plus importants. La matrice est générée dès le début du processus et les relations de voisinage directement calculées, ce qui permet de pas charger la mémoire.

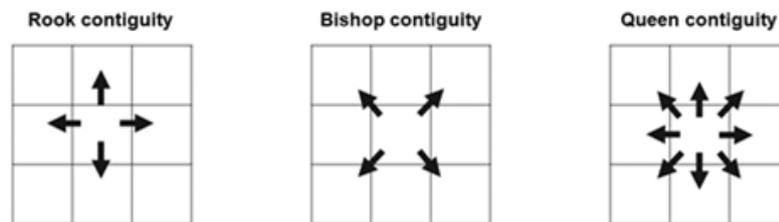


Figure 31 - Matrices de contiguïté spatiale

Quant à la contrainte d'antériorité viticole, elle permet de favoriser les mailles ayant déjà eu une implantation viticole. Si l'utilisateur a connaissance de l'emplacement d'une ancienne parcelle viticole, il est possible de l'indiquer dans le scénario ; la maille de cette dernière sera alors mise en avant dans le processus d'optimisation. Si l'utilisateur n'a pas cette connaissance de la zone d'étude, la contrainte reste intéressante puisqu'elle prend en compte les mailles jugées suboptimales par le processus. En effet, si une maille est identifiée comme suboptimale, la vigne y est implantée pour une certaine durée, par défaut 30 ans. A la fin des 30 ans, la maille est marquée comme ayant une antériorité viticole et sera favorisée lors des prochaines itérations.

Il est possible de hiérarchiser la prise en compte de chacune des contraintes selon trois niveaux : important, moyen ou faible. Ces différenciations peuvent être utiles en fonction du type d'expérimentation choisi. Dans le cas d'une recherche de zones optimales aux environs d'un vignoble existant, la contrainte de contiguïté peut être un élément important à prendre en considération ce qui donne plus de poids aux relations de voisinage. Dans le cadre d'une réimplantation d'activité viticole, la contrainte d'antériorité peut être critère à privilégier. A l'opposé des contraintes interdisant la culture de la vigne, les contraintes limitantes interviennent directement dans le processus d'optimisation. Elles sont donc réitérées à chaque pas de simulation (chaque année dans le cas présent), afin de prendre en compte le voisinage

des nouvelles mailles suboptimales, ou de favoriser l'implantation sur des mailles dont la durée d'implantation d'un cépage serait terminée.

3.1.4. Définition des objectifs

En plus de la définition des contraintes, l'utilisateur doit renseigner les objectifs recherchés lors de l'étape de scénarisation. Ces objectifs sont intégrés dans le modèle MAUVE en tant que valeurs numériques ou binaires avec des seuils limites associés. Dans le cadre de l'identification des espaces les plus adaptés à la culture de la vigne, les objectifs sont calculés sur une base d'occurrences journalières associées à différents risques climatiques et indices bioclimatiques. Ainsi, en dessous d'un seuil d'occurrences acceptables, le risque est considéré comme nul. En dessous du seuil limite, le risque est jugé acceptable, et au-delà, le risque est considéré trop important pour que la maille soit retenue comme une solution.

A l'heure actuelle, quatre objectifs ont été implémentés dans le modèle MAUVE. Ils concernent la minimisation des risques climatiques et la recherche d'un niveau de maturité en phase avec le.s cépage.s choisi.s. Pour la maturité technique, l'utilisateur doit renseigner un seuil minimal de sucre par litre (g/l) à atteindre annuellement. Ce seuil varie de 170 g/l à 220 g/l en fonction des cépages et du style de vin ciblé (Parker *et al.*, 2020a). Ce seuil minimal peut être fixe ou variable en fonction de l'année. En effet, si le seuil est fixe et qu'une maille ne l'atteint pas une année, elle est automatiquement exclue du processus d'optimisation. Un seuil de maturité fixe peut être une bonne option si les zones recherchées doivent répondre à des critères de production précis. Dans le cas d'une prospection pour de nouveaux vignobles, il peut être intéressant d'avoir un seuil de maturité ajusté à l'année en cours. Cette configuration permet de considérer des zones qui ne permettraient pas de produire raisins à haut niveau de maturité (220 g/l) dans un premier temps mais simplement d'atteindre un seuil minimal pour produire du vin (170 g/l).

Les deuxième et troisième objectifs s'attachent à minimiser le risque d'évènements gélifs et de jours chauds, entre le débourrement et la maturité technique. Par défaut, le modèle MAUVE traduit un évènement gélif comme une occurrence dont la température minimale est égale ou inférieure à 0°C (Petitjean *et al.*, 2022 ; Sgubin *et al.*, 2018 ; Webb *et al.*, 2017). Différentes occurrences de gels peuvent également être calculées et représentées comme les vagues de gel (3 jours consécutifs où $T_{min} < 0^{\circ}C$), le gel advectif¹³ ($T_{min} < 0^{\circ}C$ et vitesse de vent > 16 km/h) (BIVB, 2018 ; Poling, 2008), le gel associé à une hygrométrie importante ($T_{min} < 0^{\circ}C$ et

¹³ Gel advectif : épisode gélif caractérisé par l'arrivée d'une masse d'air froid ($< 0^{\circ}C$) ; dans ce type de gel, le vent est l'un des paramètres les plus importants.

humidité relative > 60%) (Rochard *et al.*, 2019) ou encore la date du dernier jour de gel (Gavrilescu *et al.*, 2019). Concernant le troisième objectif, un jour chaud est défini comme une occurrence dont la température maximale est égale ou supérieure à 35°C (Bonnefoy, 2013 ; Bonnefoy *et al.*, 2010) De la même manière que pour le gel, il est possible de calculer et représenter les vagues de chaleur (3 jours consécutifs).

Le dernier objectif implémenté concerne l'exposition potentielle aux risques pathogènes. Basés sur la méthode de calcul du modèle multi-agents SEVE (Simulating Environmental impacts on Viticultural Ecosystems) (Tissot *et al.*, 2017), différents paramètres sont pris en compte quotidiennement pour déterminer le déclenchement d'un traitement fongicide (température moyenne, humidité, précipitations). Dès l'initialisation, l'ensemble des vignes possède une charge d'agent pathogène, bien qu'elle soit inactive. Si les seuils d'humidité relative et de température moyennes sont réunies, l'agent pathogène monte en charge jusqu'à devenir actif dès trois occurrences. Au terme de ces trois jours, un traitement est déclenché. Lors de la phase de scénarisation, l'utilisateur doit définir le mode de traitement qui déterminera la durée d'action du produit utilisé. En mode de production conventionnel, l'utilisation de produits systémiques permet de bénéficier d'une protection d'une quinzaine de jours. En système de conduite biologique, la durée de protection est de quelques jours et peut être remise en cause en cas de pluie (dans ce cas un nouveau traitement doit être mis en œuvre). Contrairement aux risques de gel ou de jours chauds, l'utilisateur n'a pas à définir de seuils acceptables pour l'exposition aux risques pathogènes. Par défaut, le modèle MAUVE cible une utilisation minimale du nombre de traitements. Il paraît en effet difficile de prédire un nombre maximal de traitements à l'échelle annuelle puisqu'ils sont fortement dépendants des conditions météorologiques (humidité, températures). De plus, une année relativement humide n'empêche pas la production de raisins.

3.2. Etape d'initialisation

Après la définition des différents paramètres du scénario (modèle climatique et scénario associé, zone d'étude, définition des contraintes et objectifs et les seuils associés, choix du/des cépage-s à implanter), la partie initialisation débute (Figure 32).

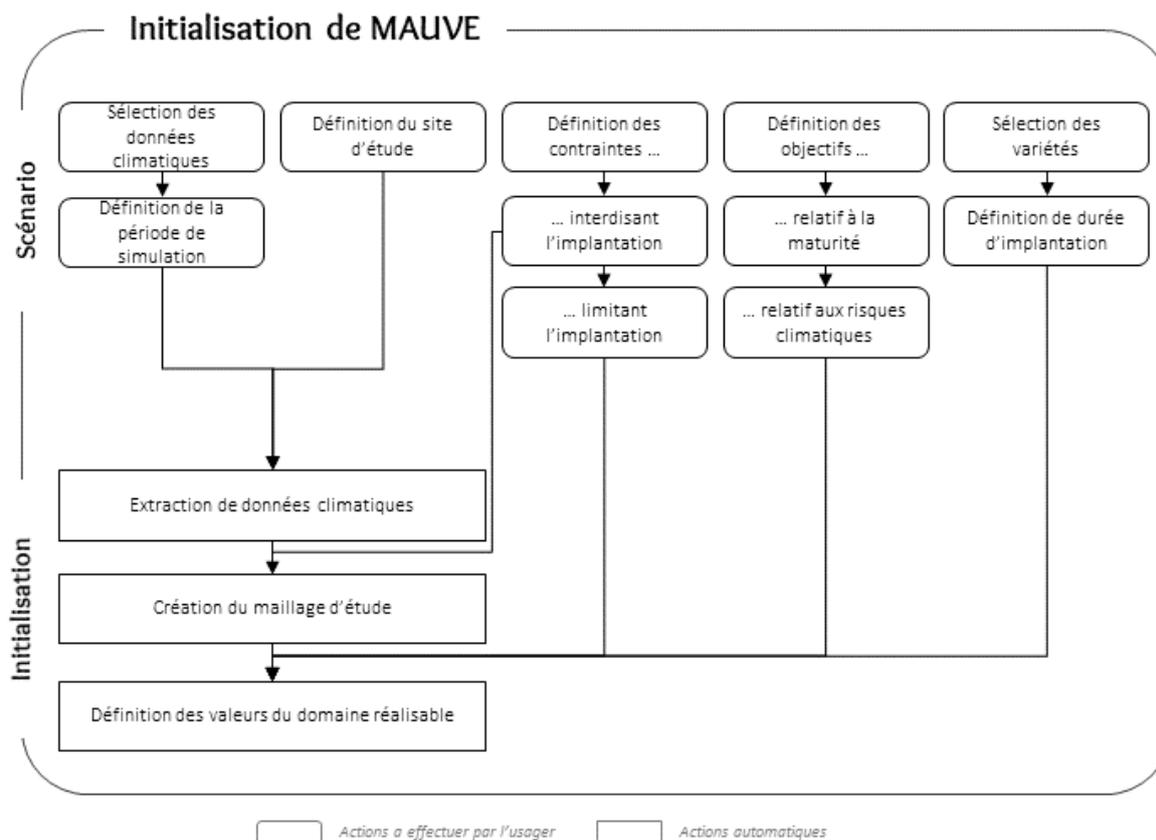


Figure 32 - Etapes de l'initialisation du modèle MAUVE

La première étape de l'initialisation est l'importation des données climatiques, puis l'extraction des données en fonction de la période de simulation choisie. La résolution spatiale des modèles détermine le maillage de la zone d'étude (maille de 8 km pour la France). Afin d'alléger les jeux de données, les mailles concernées par des contraintes excluantes sont retirées du processus de simulation. Dans un premier temps, les données vectorielles sont reclassées en binaire : surface agricole/non-agricole, sol drainant/non-drainant. La surface de ces différentes classes est ensuite calculée proportionnellement à l'espace occupé au sein de chaque maille. Ainsi, les mailles ne correspondant pas aux surfaces définies par les contraintes du scénario sont exclues du jeu de données. Cette exclusion permet d'éliminer les espaces non adaptés à la culture de la vigne.

Le domaine réalisable est défini par la période de simulation. Celui-ci est restreint en fonction d'une valeur médiane calculée à partir de la plage de scores obtenus au cours de cette période. La restriction du domaine réalisable est un point essentiel. Elle permet de minimiser le poids des années exceptionnelles ou extrêmes. En effet, sans l'aide la médiane (plus robuste) les années exceptionnelles (favorables ou défavorables à la viticulture) peuvent orienter le processus d'optimisation vers les extrêmes et fausser la représentation des solutions suboptimales. Ces valeurs sont fortement dépendantes de la zone d'étude, des scénarios climatiques et de la période de simulations définies lors de la phase de scénarisation.

3.3. La simulation

Après la création d'une nouvelle grille de mailles adaptées au scénario et aux valeurs du domaine réalisable, l'étape de simulation commence. La première étape permet de modéliser les principaux stades phénologiques de la culture. En fonction des dates de ces stades, les différentes occurrences (nombre de gel, vagues de chaleur...) sont calculées en lien avec les objectifs définis. Les occurrences sont ensuite analysées afin de sélectionner les solutions suboptimales (Figure 33).

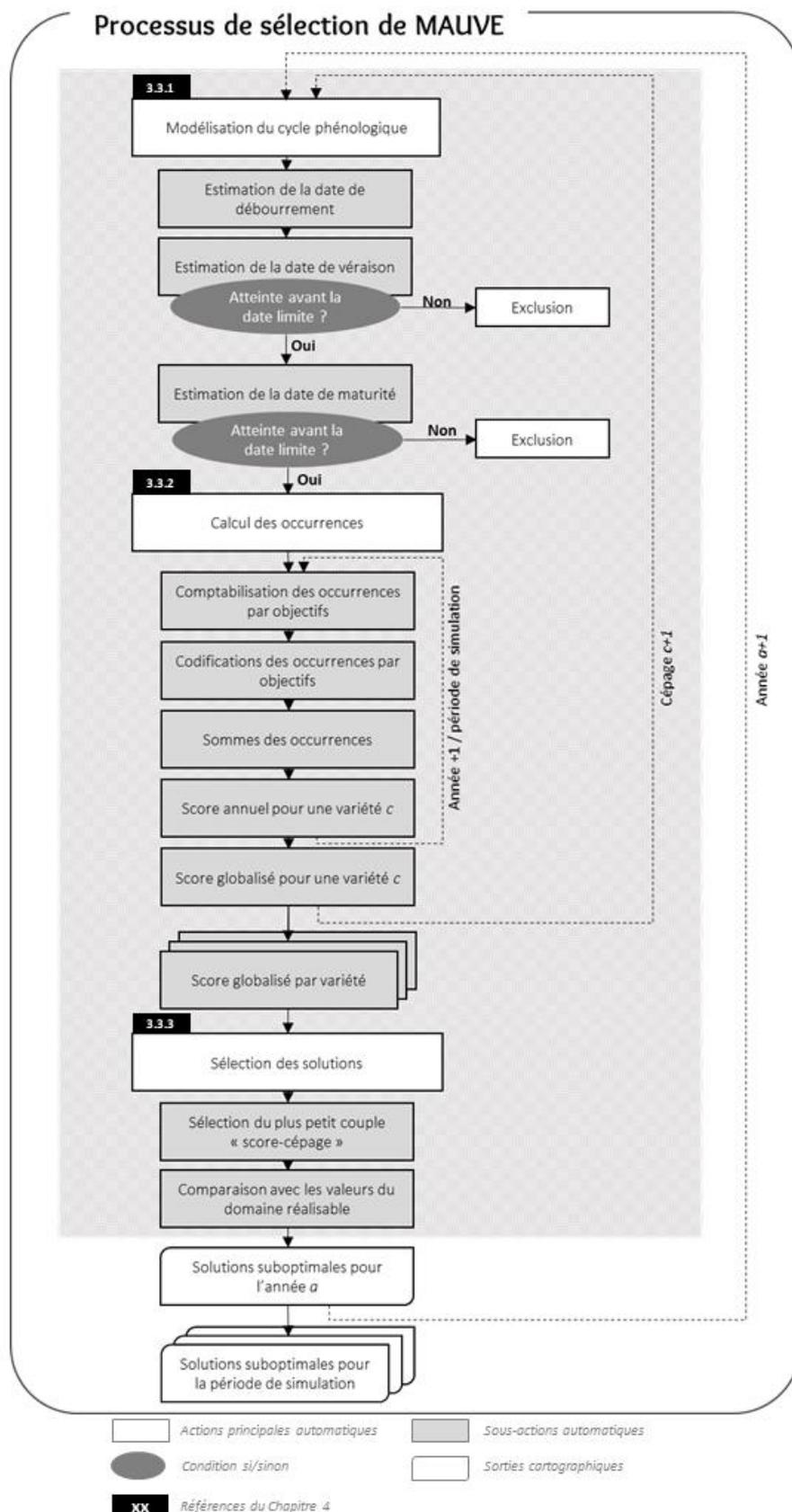


Figure 33 - Etapes de simulation du modèle MAUVE

3.3.1. Phénologie et occurrences de vulnérabilité relatives aux objectifs

▪ Modélisation des stades phénologiques

Dans un premier temps et en lien avec l'identification des espaces les plus adaptés à la viticulture, le modèle MAUVE calcule les différents stades phénologiques de la vigne pour chacune des mailles présentées. Cette étape est très importante puisque l'étude de la croissance annuelle de la vigne permet de mieux comprendre et appréhender la réponse de la vigne aux températures (Parker *et al.*, 2011, 2020a).

Le débourrement

Le cycle végétatif de la vigne commence dès lors que les bourgeons éclosent et que les premières feuilles se développent. Cette phase, appelée le **débourrement**, est supposée atteinte lorsque 50% des bourgeons débourrent (García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2009 ; Pellegrino *et al.*, 2022 ; van Leeuwen *et al.*, 2004). La date de débourrement dépend de plusieurs facteurs, notamment les températures hivernales et printanières mais également du matériel végétal. Le débourrement est une phase très importante puisqu'à partir de ce stade, les bourgeons sont particulièrement sensibles au gel (Sgubin *et al.*, 2018 ; Webb *et al.*, 2017). Une avancée des dates de débourrement expose particulièrement le plant aux gelées tardives (Petitjean *et al.*, 2022 ; Ramos et Jones, 2018 ; Seguin et Garcia de Cortazar, 2005, p. 20 ; Sgubin *et al.*, 2018).

Bien qu'il existe différents modèles pour calculer la date de débourrement, l'ensemble des calculs prennent comme référence le stade C de la classification de Baggiolini (Baggiolini, 1952). Afin de simuler la date de débourrement, MAUVE intègre un modèle simple basé sur le cumul des degrés jours (Pellegrino *et al.*, 2022 ; Sgubin *et al.*, 2019 ; van Leeuwen *et al.*, 2008) (Équation 3). La somme des températures supérieures à 10°C débute alors à partir du 1^e janvier pour l'HN (Sgubin *et al.*, 2019 ; van Leeuwen *et al.*, 2004), date à laquelle la dormance de la vigne est supposée terminée (García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2009 ; Pellegrino *et al.*, 2022). En fonction de différents seuils des degrés jours attribués à chaque cépage, la date de débourrement peut être définie (Tissot *et al.*, 2020 ; van Leeuwen *et al.*, 2008).

Équation 3 – Calcul de la date de débourrement - GDD

$$GDD = \sum_{01.01} ((T_m - 10) \geq 0)$$

où T_m est la Température moyenne

La floraison et la véraison

Suite au débourrement, les inflorescences vont se développer jusqu'à la floraison. Ce stade, noté I dans la classification de Baggiolini (Figure 30), est atteint lorsque 50% de ces inflorescences sont matures (Loussert, 2017). Environ deux mois après la floraison, un changement de couleur s'opère sur les baies dû à l'accumulation du sucre dans les grappes (Le Roux, 2017). Ce changement de couleur correspond au stade de véraison, noté M sur la classification de Baggiolini (Figure 30). De la même manière que pour le débourrement, la floraison et la véraison sont fortement dépendantes des conditions climatiques et du matériel végétal utilisé.

Afin de pouvoir déterminer les dates de ces deux stades, le modèle GFV (Grapevine Flowering Véraison, Parker et al., 2011) a été implémenté dans MAUVE (Équation 4). Pour rappel, avec ce modèle, les erreurs d'estimation de dates de floraison et véraison sont inférieures à 1 semaine pour le Sauvignon blanc dans la région de Marlborough (Nouvelle-Zélande) et le Chardonnay dans la région de Bordeaux (France) (Parker et al., 2013, 2020b).

Équation 4 – Calcul du Grapevine Flowering Véraison

$$GFV = \sum_{01.03}^{30.09} \left(\frac{Tn + Tx}{2} \right) > 0$$

où Tn représente les températures minimales, et Tx les températures maximales

Grâce aux résultats obtenus, la date simulée de véraison est analysée : si la véraison intervient après le 1^{er} septembre pour l'HN (1^{er} mars pour l'HS), la maille n'est pas retenue comme une solution potentielle. En effet, dans l'HN, la maturité idéale devrait être atteinte au plus tard à la mi-octobre (Leeuwen et al., 2009 ; van Leeuwen et Darriet, 2016). Or, la maturité phénologique est atteinte entre un mois et un mois et demi après la véraison (van Leeuwen et Darriet, 2016 ; van Leeuwen et Seguin, 2006), soit le 1^{er} septembre au plus tard.

La maturité

Suite à la véraison, les sucres s'accumulent dans les baies jusqu'aux vendanges. Si les vendanges sont déterminées par le viticulteur, il est possible d'estimer le niveau de maturité technique. Représentée par le stade M dans la classification de Baggiolini, la maturité technique peut être définie grâce à différentes concentrations de sucre (g/l), en fonction des cultivars, grâce au modèle GSR (Grapevine Sugar Ripeness, Parker et al., 2020a), également implémenté dans MAUVE (équation 5). Pour rappel, l'erreur d'estimation de maturité du GSR est d'environ 7 à 10 jours, en fonction des niveaux de maturité retenus (Parker et al., 2020b).

Équation 5 – Calcul du Grapevine Sugar Ripeness

$$GSR \sum_{01.04}^{30.09} \left(\frac{Tn + Tx}{2} \right) > 0$$

où Tn représente les températures minimales, et Tx les températures maximales

Si la maturité technique est estimée après le 15 octobre (dans l'HN, ou 15 avril pour l'HS), la maille est exclue des solutions potentielles. Cependant, si l'utilisateur avait laissé la possibilité d'abaisser le seuil de maturité technique dans le scénario, la date de maturité est recalculée avec un seuil de maturité inférieur. Si la date estimée de maturité est toujours supérieure au 15 octobre, la maille est exclue du processus ; en revanche, si la maturité intervient avant la date limite, la maille est retenue comme une solution potentielle avec un « malus » puisqu'elle ne correspond pas totalement à la demande initiale de l'utilisateur. Cette approche de malus/bonus est inspirée des méthodes de *scoring* : un score est attribué à chaque contrainte/critère en fonction de sa correspondance avec le but recherché.

La période de vulnérabilité aux aléas climatiques pour la vigne se situe donc entre le débourrement et la maturité.

▪ **Calcul des occurrences relatives aux objectifs**

En accord avec les paramètres définis dans le scénario, le modèle MAUVE comptabilise, annuellement et pour chaque maille de la zone simulée, toutes les occurrences relatives aux objectifs entre ces deux stades phénologiques.

A la fin d'une année n , chaque maille possède donc trois scores représentant les occurrences de jours chauds, d'évènements gélifs et d'expositions potentielles aux risques pathogènes. MAUVE comptabilise ces différentes occurrences en fonction des seuils acceptables et limites définis pour chaque objectif. Cette classification est annualisée, et à ce stade, chaque maille considérée ne possède plus qu'un seul score englobant les différents objectifs pour l'année n . Le modèle va effectuer cette routine (calcul des occurrences, classification, annualisation) de l'année n , jusqu'à la fin de la durée d'implantation de la vigne. Par exemple, si la période de simulation commence en 2006 et que la période d'implantation est définie à 30 ans, MAUVE effectue une première routine de 2006 jusqu'à 2036. L'intégration d'une période d'implantation est très importante puisqu'elle permet de vérifier que tous les objectifs seront correctement atteints, sur l'ensemble de la période. Au terme de cette routine, chaque maille présente autant de scores annuels qu'il y a d'années dans une période d'implantation. L'ensemble de ces scores est ensuite globalisé, par maille.

Le processus est répété pour chaque cépage choisi lors de la phase de scénarisation (calcul des occurrences, classification, annualisation, globalisation sur la période d'implantation). A cette étape, chaque maille possède autant de scores globalisés que de cépages. Dans un souci de simplification, nous parlerons de couple « score-cépage ».

3.3.2. Sélection des solutions suboptimales

Après le calcul des différentes occurrences, le modèle MAUVE opère plusieurs sélections afin de déterminer la ou les variété.s et les mailles les plus adaptées. La première sélection permet de déterminer la variété la plus adaptée à chaque maille de la zone d'étude. Puisque les objectifs implémentés font références à des minimisations d'expositions aux aléas climatiques, plus les scores globalisés seront petits, plus la solution sera adaptée. Pour chaque maille, MAUVE reprend l'ensemble des couples « scores-cépages » et sélectionne le plus petit score. A ce stade, l'ensemble des mailles présentées possède un cépage qui lui semble adapté.

Les couples « scores-cépages » restants sont triés en fonction de la gamme de valeurs obtenues lors de l'initialisation. Tous les scores équivalents ou inférieurs à la valeur la plus haute de l'initialisation sont désormais considérés comme des solutions suboptimales. Au terme de cette seconde sélection, seuls les couples « scores-cépages » les plus adaptés à l'ensemble du territoire (et au scénario) sont conservés. Lorsqu'une solution est considérée comme suboptimale, la maille concernée est exclue du processus pendant toute la période supposée d'implantation (30 ans par exemple). Au terme de la durée spécifiée, la maille est remise en jeu.

L'ensemble du processus est répété pour chaque année de la période de simulation en ajoutant les contraintes de voisinage et d'antériorité viticole. Ainsi, en fonction des paramètres définis dans le scénario, un « bonus » peut être attribué au voisinage d'une solution suboptimale comme dans le cas d'une méthode de scoring. Si une maille considérée comme suboptimale à une période est remise en jeu, un « bonus » d'antériorité viticole lui est attribué, en fonction du choix de l'utilisateur.

3.4. Les sorties du modèle

En sortie, le modèle MAUVE propose plusieurs types de restitutions (**Tableau 13**). Le premier est un assemblage cartographique représentant les différentes solutions suboptimales. Plusieurs configurations peuvent être proposées : une représentation annuelle ou par période, une comparaison entre différents modèles ou entre différents scénarios, une représentation cépage par cépage ou pour différents cépages.

La représentation des occurrences liées aux risques climatiques est également disponible sous une forme analogue à la représentation des solutions suboptimales. Les indices de Winkler, de Huglin, GSR, GFV, GWI et le DI peuvent être également cartographiés ou exportés en fichier texte (format .csv) tout comme les dates des différents stades phénologiques (débourrement, floraison, véraison, maturité technique). L'ensemble de ces résultats sont proposés à l'échelle de chaque maille et à pas de temps annuel.

		Formats disponibles		
		Carto.	Tableur	
MAUVE	Solutions suboptimales d'implantation	Par variété	x	x
		Choix entre variétés	x	x
RISQUES CLIMATIQUES	Occurrences d'événements gélifs	Jours de gel **	x	x
		Vagues de gel **	x	x
		Gel advectif **	x	x
		Gel « humide » **	x	x
		Date du dernier jour de gel	-	x
	Occurrences d'événements chauds	Jours de fortes chaleurs **	x	x
		Vagues de chaleur **	x	x
	Occurrences pathogènes	Expositions potentielles en biologique **	x	x
		Exposition potentielles en conventionnel **	x	x
	INDICES	Bioclimatiques	Winkler	x
GDD **			x	x
Huglin			x	x
Dryness Index			x	x
GFV			x	x
GSR			x	x
Stades phénologiques		Date de débourrement	-	x
		Date de floraison	-	x
		Date de véraison	-	x
		Date de maturité technique	-	x

- Donnée indisponible,

x Donnée disponible,

** Calculé entre le débourrement et la maturité technique

Tableau 13 – Résumé des résultats et formats disponibles, annuellement et par maille, sous MAUVE

4. Conclusion de chapitre

La démarche de modélisation proposée dans ce chapitre permet de traiter des impacts du changement climatique et d'établir différents scénarios de ces impacts. L'objectif premier du modèle MAUVE est de proposer une approche d'optimisation spatiale afin d'identifier les zones viticoles appropriées, en fonction de différents scénarios. MAUVE permet d'obtenir différentes projections spatiales et temporelles, dans un contexte de changement climatique. Grâce à cette démarche, il est possible de mettre en évidence des solutions d'adaptation suboptimales pour les zones viticoles traditionnelles ou d'explorer de nouvelles opportunités dans les régions viticoles émergentes. Dans le premier cas, l'emplacement actuel du vignoble est pris en compte, et le modèle tend à évaluer les zones les plus appropriées pour un ou plusieurs scénarios de changement climatique. Dans le cas d'un vignoble émergent, le modèle fournit des solutions suboptimales mettant en évidence les meilleurs emplacements et choix de cépages en fonction du scénario établi.

Grâce à différents objectifs et contraintes fixés par l'utilisateur durant l'étape de scénarisation, le modèle MAUVE identifie les espaces viticoles suboptimaux compte tenu de différentes contraintes. Basé sur une approche d'optimisation spatiale et multiobjectifs, MAUVE permet de calculer les meilleures combinaisons de faibles expositions à divers risques climatiques, tout en cherchant à atteindre un bon équilibre du cycle phénologique matérialisé par des indicateurs bioclimatiques. Il est important de souligner que si une cellule n'est pas définie comme suboptimale cela ne signifie pas qu'elle est défavorable à la viticulture, mais simplement que la combinaison des objectifs et des contraintes n'est pas aussi bonne qu'une cellule suboptimale.

Globalement, l'intégration de plusieurs échelles temporelles (données climatiques quotidiennes agrégées annuellement et comparées à une période de référence) couplées à des données spatiales semble bien adaptée pour évaluer les potentialités agroclimatiques de la viticulture. En effet, afin d'évaluer l'adéquation d'un territoire, notamment dans un contexte de changement climatique, il semble évident d'analyser son potentiel phénologique pendant une période d'implantation significative. Le modèle MAUVE permet de tester facilement différentes hypothèses, objectifs et contraintes, quelle que soit leur nature (agronomique, anthropique, environnementale, économique, etc.). Par exemple, la contiguïté des parcelles à une échelle très fine peut être un enjeu important pour les propriétaires, les risques climatiques peuvent être perçus différemment selon les régions ou les caractéristiques des vignobles, etc.

CONCLUSION DEUXIEME PARTIE

L'état de l'art réalisé dans cette deuxième partie a fourni les bases conceptuelles et méthodologiques nécessaires à la construction d'un cadre de modélisation propice à l'identification de zones suboptimales à la viticulture dans un contexte de changement climatique. Issu de cette réflexion, le modèle MAUVE offre la possibilité d'intégrer des contraintes spatio-temporelles dans une démarche d'optimisation multiobjectifs. Au-delà des conditions agroclimatiques nécessaires à la viticulture (somme de degrés-jour, indice de Huglin, etc.), le modèle proposé permet ainsi de considérer des contraintes de diverses natures (contiguïté spatiale, valeurs environnementales, approche économique, etc.) et propose une vision globale des enjeux inhérents à la recherche des meilleurs compromis pour identifier des zones de production viticoles pertinentes au regard d'un scénario prédéfini.

En optimisation, la mise en œuvre d'une simulation est fortement conditionnée par les objectifs imposés lors de la phase de scénarisation. L'implémentation de scénarios permet de considérer différentes visions d'une même problématique : recherche d'un niveau de maturité spécifique, mise en avant de valeurs environnementales, préoccupations économiques, etc. En privilégiant une approche générique guidée par les données, le modèle MAUVE permet la création de scénarios variés en autorisant la combinaison d'objectifs et de contraintes de natures multiples (spatiales, temporelles, climatiques, etc.). Ainsi, plusieurs configurations peuvent être formulées comme la conservation des régions viticoles existantes en privilégiant le maintien d'un certain optimum thermique, la recherche d'espaces de moindres coûts agronomiques en optimisation au maximum l'itinéraire agronomique, la mise en avant d'objectifs environnementaux en privilégiant la réduction d'intrants, etc.

PARTIE 3

RESULTATS ET CAS D'APPLICATION

Afin de comprendre si les espaces côtiers et insulaires sont des espaces à privilégier dans un contexte de changement climatique, le modèle MAUVE a été appliqué à deux configurations différentes : l'île du Sud en Nouvelle-Zélande (CHAPITRE 5) et la Bretagne en France (CHAPITRE 6). Ces applications visent à répondre à deux enjeux majeurs :

- *Comprendre l'évolution des régions viticoles traditionnelles, analyser et anticiper les impacts du changement climatique sur la distribution spatiale des zones agroclimatiques optimales,*
- *Identifier des sites pertinents pour la culture de la vigne dans un contexte de changement climatique, en prenant en compte un ensemble de contraintes spatiales et temporelles (biophysiques, agroclimatiques, anthropiques).*

En Nouvelle-Zélande, si les premières plantations remontent au 19^e siècle, l'essor de la viticulture date des années 1980. Depuis les deux dernières décennies, le vin blanc néozélandais issu du Sauvignon blanc connaît un franc succès (Hill, 2021). Ce vin blanc fruité et aromatique est typique de la région de Marlborough, qui constitue la première région viticole du pays. Le changement climatique pourrait remettre en question la typicité de ce vin emblématique et pose plus généralement la question du maintien des vignobles dans leurs limites géographiques actuelles.

En France, la Bretagne représente une région émergente pour la viticulture. A l'inverse de la Nouvelle-Zélande, les parcelles dédiées à la vigne sont de tailles relativement modestes et s'insèrent dans un environnement contraint : urbanisation, fragmentation du paysage, tourisme, etc.

En appliquant le modèle MAUVE à ces deux configurations, l'objectif est de répondre aux différentes questions posées dans l'introduction de cette thèse et notamment d'évaluer les potentialités des espaces littoraux et insulaires dans un contexte de changement climatique. Ces expérimentations fourniront également un cadre d'analyse des limites et incertitudes du modèle MAUVE abordées en CHAPITRE 7.

CHAPITRE 5

Analyse de l'évolution spatiale des zones viticoles suboptimales en Nouvelle-Zélande

Ce cinquième chapitre présente une expérimentation du modèle MAUVE en Nouvelle-Zélande. Dans un premier temps, les contextes viticole et climatique de la Nouvelle-Zélande seront exposés. Puis, à l'aide d'un scénario établi, le modèle MAUVE permettra de mieux appréhender les impacts de deux scénarios du changement climatique sur l'évolution des vignobles à l'échelle de l'île du Sud. Cette expérimentation permettrait d'appréhender la question de la place de la viticulture dans un contexte de changement climatique. En effet, le Sauvignon représente plus de 60% de l'encépagement du pays et permet de produire des vins emblématiques, notamment dans la région de Marlborough. Or, dans un contexte d'augmentation des températures, sera-t-il toujours possible de produire la même qualité et le même style de vin dans les mêmes zones géographiques qu'aujourd'hui ? Le Sauvignon restera-t-il un cépage adapté aux conditions climatiques de demain ?

SOMMAIRE DE CHAPITRE

1. LE CONTEXTE VITICOLE NEOZELANDAIS.....	142
2. LE CONTEXTE CLIMATIQUE	145
2.1. LE CONTEXTE REGIONAL.....	145
2.2. LE CONTEXTE LOCAL.....	148
3. MODELISATION DES POTENTIALITES VITICOLES NEOZELANDAISES FUTURES	152
3.1. SCENARISATION	152
3.1.1. <i>Modèle climatique et scénario</i>	152
3.1.2. <i>Cépages à implanter</i>	153
3.1.3. <i>Définition des contraintes</i>	153
3.1.4. <i>Définition des objectifs</i>	154
3.2. ANALYSE DE L'EVOLUTION DES PRINCIPAUX INDICATEURS	155
3.2.1. <i>Comparaison des modèles climatiques</i>	155
3.2.2. <i>Evolution de l'indice héliothermique de Huglin</i>	159
3.2.3. <i>Le risque d'évènements climatiques extrêmes</i>	160
3.3. RESULTATS D'OPTIMISATION	161
4. CONCLUSION DE CHAPITRE	164

Avant-propos - Cette expérimentation néozélandaise a été menée avec l'aide de Baptiste Hamon, dans le cadre d'un stage de fin d'étude (Master Sciences de la Terre et des Planètes, Environnement – Université Grenoble Alpes). Une partie des résultats obtenus (application à la région de Marlborough) est en cours de publication dans un article intitulé « Identification of suboptimal viticultural areas by spatial optimization. Application in New Zealand, South Island, in a context of climate change », dans la revue *Oeno One*, et co-rédigé par Baptiste Hamon, Jeanne Thibault, Cyril Tissot, Amber Parker et Hervé Quénol.

1. Le contexte viticole néozélandais

En Nouvelle-Zélande, la culture de la vigne débute au XIX^e siècle avec l'arrivée d'européens, mais ne se développe réellement qu'à partir de la Seconde Guerre Mondiale. En effet, plusieurs facteurs ont freiné l'implantation des vignobles néozélandais tels que les attaques d'oïdium et la crise phylloxérique mondiale, mais également des aspects plus culturels privilégiant la bière ou les alcools plus forts. De plus, le mouvement social « New Zealand Temperance Society » relativement influent à la fin du XIX^e siècle, a encouragé la promulgation d'une réglementation stricte sur l'alcool qui a limité l'essor de la viticulture néozélandaise. Après la guerre, la pression des viticulteurs a permis d'assouplir cette réglementation et de taxer les importations d'alcool. Depuis la fin des années 1980, la Nouvelle-Zélande a adopté une politique visant à l'amélioration de la qualité des vins et à l'exportation. La superficie en vigne a quintuplé en 15 ans, passant de 7 500 ha en 1995 à 40 684 ha en 2020 (Figure 34). En 2021, si la Nouvelle-Zélande se classe comme le 31^{ème} pays en terme de surface viticole avec 40 720 ha, le pays est le 16^{ème} producteur mondial de vin avec une production de 2 664 000 hl (OIV, 2022).

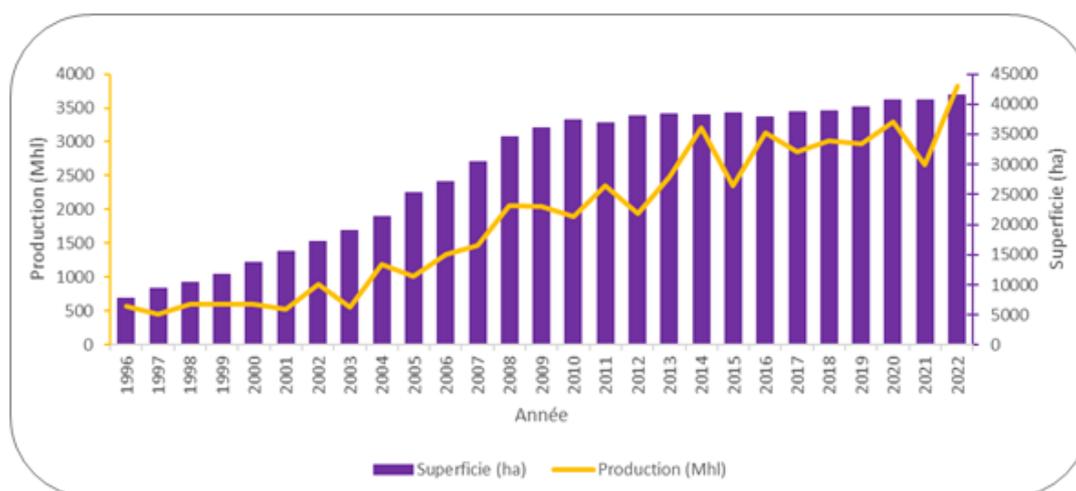


Figure 34 - Evolution de la surface et de la production viticole de Nouvelle-Zélande

Source : OIV, 2022

Avec une superficie totale de 34 000 ha, plus de 80% des régions viticoles néo-zélandaises sont situées sur l'île du Sud (Marlborough, Nelson, Canterbury et Central Otago) (Figure 35). Sur l'ensemble de l'encépagement du pays, 33 752 ha sont dédiés à des cépages blanc (81% de la surface viticole néozélandaise) dont 64% en Sauvignon blanc (26 559 ha) (Tableau 14). Si ce cépage est nettement dominant en Nouvelle-Zélande, le Chardonnay et le Pinot Gris sont les deux autres cépages blancs majoritaires, représentant 3 187 ha et 2 809 ha. Les deux cépages rouges les plus représentés en 2022 sont le Pinot noir avec 5 807 ha et le Merlot avec 1 077 ha (New Zealand Wine, 2022).

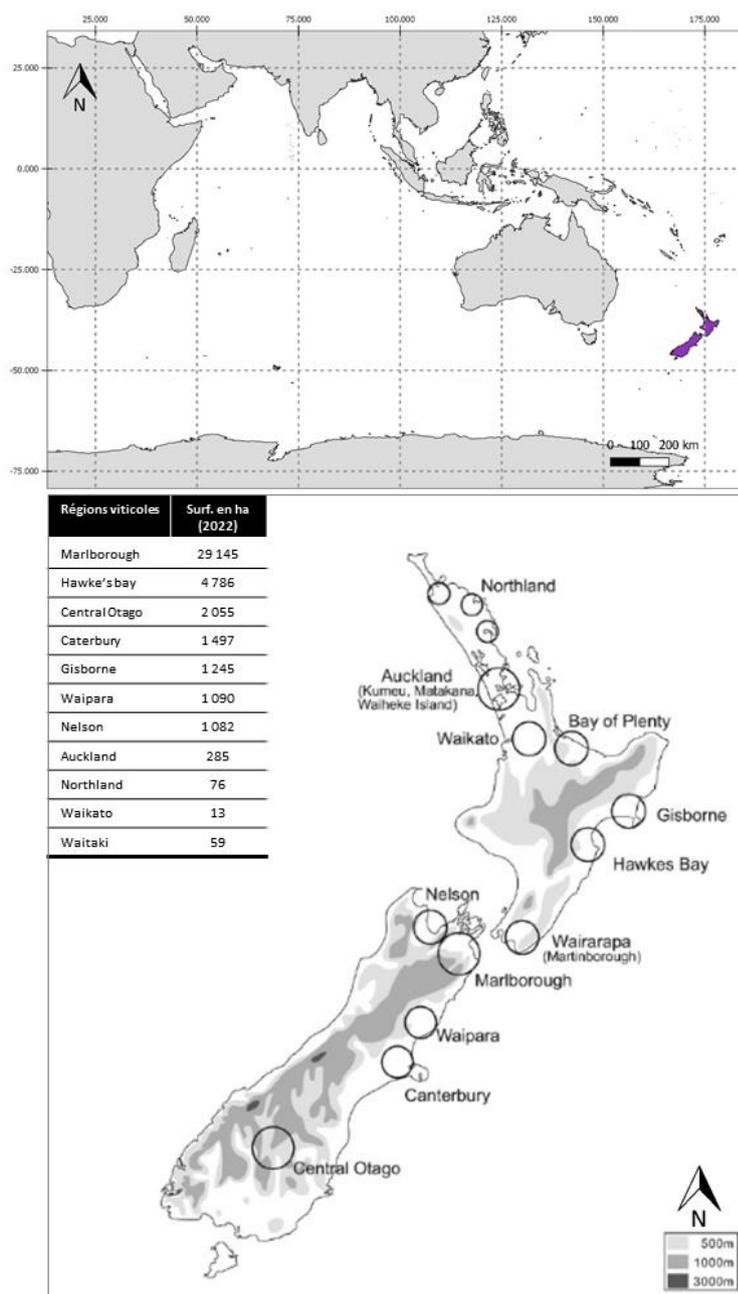


Figure 35 - Localisation des principaux vignobles de Nouvelle-Zélande

Adaptée de Sturman et al., 2016

Données : New Zealand Wine, 2022

Variétés	Superficie (ha)	% de la surface totale **
Sauvignon blanc	26 559	63.84
Pinot noir	5 807	13.96
Chardonnay	3 187	7.66
Pinot Gris	2 809	6.75
Merlot	1 077	2.59
Riesling	619	1.49
Syrah	444	1.07
Cabernet Sauvignon	207	0.5
Gewürztraminer	197	0.47
Sauvignon Gris	102	0.27

** pourcentage par rapport à la superficie totale en vignes du pays en 2022

Cépage : cépage rouge, Cépage : cépage blanc

Tableau 14 - Superficie et production des principaux cépages de Nouvelle-Zélande en 2022

Source : New Zealand Wine, 2022

2. Le contexte climatique

2.1. Le contexte régional

En Nouvelle-Zélande, la vigne est cultivée sur l'ensemble des deux îles et sous différents climats, passant d'un climat subtropical pour les régions viticoles du nord à des climats tempérés plus frais au sud de l'île du Sud près de Central Otago (Sturman et QuénoI, 2013) (Figure 36). Dans les régions les plus fraîches, Central Otago et Canterbury, les degré-jours de croissance sont de l'ordre de 900, contre 1 600 à Auckland, et les températures de l'air moyennes varient de 14.3°C jusqu'à 17.6°C durant la période de croissance (Imre et Mauk, 2009) (Tableau 15, Figure 36).

La complexité du terrain (topographie, distance à l'océan, etc.) entraînent d'importantes variations aux échelles locales, et les disparités spatio-temporelles des climats régionaux influencent significativement les vins produits d'une année sur l'autre (quantité, qualité, caractéristiques) (Sturman et QuénoI, 2013). Les principaux risques climatiques pouvant affecter la culture de la vigne sont les maladies cryptogamiques et les gelées printanières. En effet, dans les secteurs chauds et humides, le risque de développement de maladies comme le botrytis et le mildiou sont plus importants. Dans les vignobles plus austraux, le risque de gelées tardives (ou gelées printanières) est également très élevé (Le Roux, 2017). Les conditions climatiques plus fraîches des vignobles du sud du pays sont très favorables à l'élaboration des vins fins, souvent primés (Imre et Mauk, 2009 ; Sturman *et al.*, 2014).

New Zealand median annual average temperature

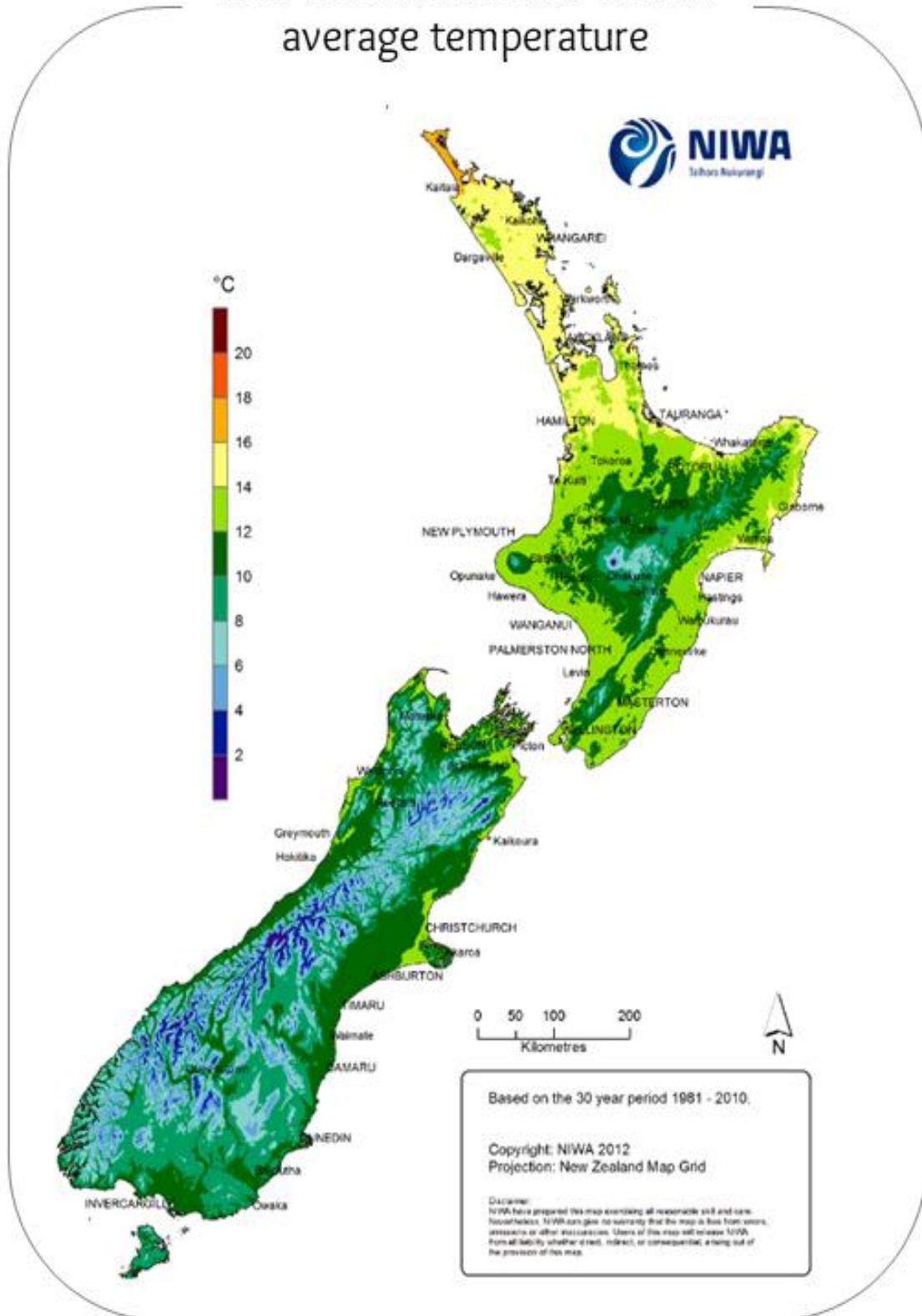


Figure 36 - Température médiane annuelle en Nouvelle-Zélande

Source : NIWA, 2022

Région	Temp. annuelle moyenne (°C)	Temp. minimale moy. du mois le plus froid (°C)	Déficit pluvio. annuel moyen (mm)	Temp. moyenne de la saison végétative	Cumul de GDD durant la saison végétative
Auckland	14.2 – 14.7	5.1 – 6.3	40.3 – 43.5	17.6	1617
Northland	14.2 – 14.7	5.1 – 6.3	40.3 – 43.5	17.1	1510
Canterbury	9.5 – 10.5	-0.9	82.4 – 112	14.4	927
Central	8.1 – 10.2	-2.2	51.3 – 307	14.4	908
Otago					
Gisborne	13.3 – 13.6	3.1 – 3.3	169 – 183	16.7	1394
Hawkes Bay	12.3 – 13.6	2.5 – 3.8	34.0 – 183	16.7	1415
Marlborough	11.2 – 12.7	0.6 – 3.1	110 – 261	15.5	1165
Nelson	12.3	2.5	90.6	15.3	1112
Waikato	14.2 – 14.2	2.6 – 5.1	5.2 – 43.5	16.1	1068
Waipara	11.3	0.6	182-183	14.9	1038
Wairarapa	12.7	3.6 – 3.7	107 – 965	14.9	1033

Tableau 15 - Caractéristiques climatiques des principales régions viticoles de Nouvelle-Zélande

Source : Imre et Mauke, 2009

Dans un contexte de hausse des températures moyennes à l'échelle globale, il semble très probable qu'une augmentation similaire puisse avoir lieu sur l'ensemble des régions viticoles néozélandaises. Cependant, les différentes configurations spatiales (topographie, proximité de l'océan, etc.) des vignobles commerciaux pourraient entraîner différentes réponses de la vigne à cette augmentation globale. En effet, la complexité du terrain néozélandais crée des climats locaux et régionaux spécifiques qui permettent d'exploiter différents espaces favorables à la viticulture (Sturman et Quéno, 2013).

2.2. Le contexte local

Marlborough est la principale région viticole de Nouvelle-Zélande. Située au nord-est de l'île du Sud, la région est bordée par l'océan Pacifique et entourée de hautes montagnes. Cette chaîne montagneuse engendre une importante variabilité climatique pouvant impacter le style de vin. Elle permet également de protéger les vignobles des vents dominants d'ouest et de l'ombre pluviométrique (Trought *et al.*, 2016). Les vignes sont implantées dans les plaines inondables des rivières Wairau et Awatere, et bénéficient de sols sablonneux, graveleux peu profonds, entrecoupés des sections de sols limoneux plus profonds (Bramley *et al.*, 2019). Les études de Trought et Bramely ont démontré que les variations de profondeur et de texture des sols impactent la vigueur de la vigne et la composition des raisins (Bramley *et al.*, 2011 ; Trought *et al.*, 2008). Les vignes les plus vigoureuses se développent ainsi sur les sols limoneux plus profonds (Bramley *et al.*, 2011 ; Trought et Bramley, 2011).

Au-delà de la structure des sols, la température de l'air est le facteur météorologique pouvant le plus influencer le rendement et la qualité du vignoble. Dans la région de Marlborough, la proximité de l'océan (brise de mer, inertie thermique) conjuguée aux effets du relief accidenté (écoulement d'air froid, effet de Foehn) entraînent d'importantes variations des températures. Cette topographie particulièrement marquée expose fréquemment les vignes aux épisodes de gel et nécessite un suivi à l'échelle locale afin de mieux appréhender ces variations brutales de températures. Une trentaine de stations météorologiques appartenant au réseau météorologique du National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA¹⁴), enregistrent les températures à l'échelle de la région de Marlborough. Dans une étude réalisée en 2013, Philippe et consorts ont analysé 11 stations météorologiques sur la région et mis en évidence une influence maritime sur les températures (Philippe *et al.*, 2013) (Figure 37).

¹⁴ La NIWA est un « Crown Research Institute », c'est-à-dire une société appartenant à la Couronne créée dans le but d'entreprendre des recherches scientifiques (niwa.co.nz). Les missions principales de la NIWA sont de permettre une utilisation plus durable des ressources naturelles, de proposer une meilleure gestion de l'environnement et d'apporter des réponses efficaces au changement climatique global (NIWA, 2022).

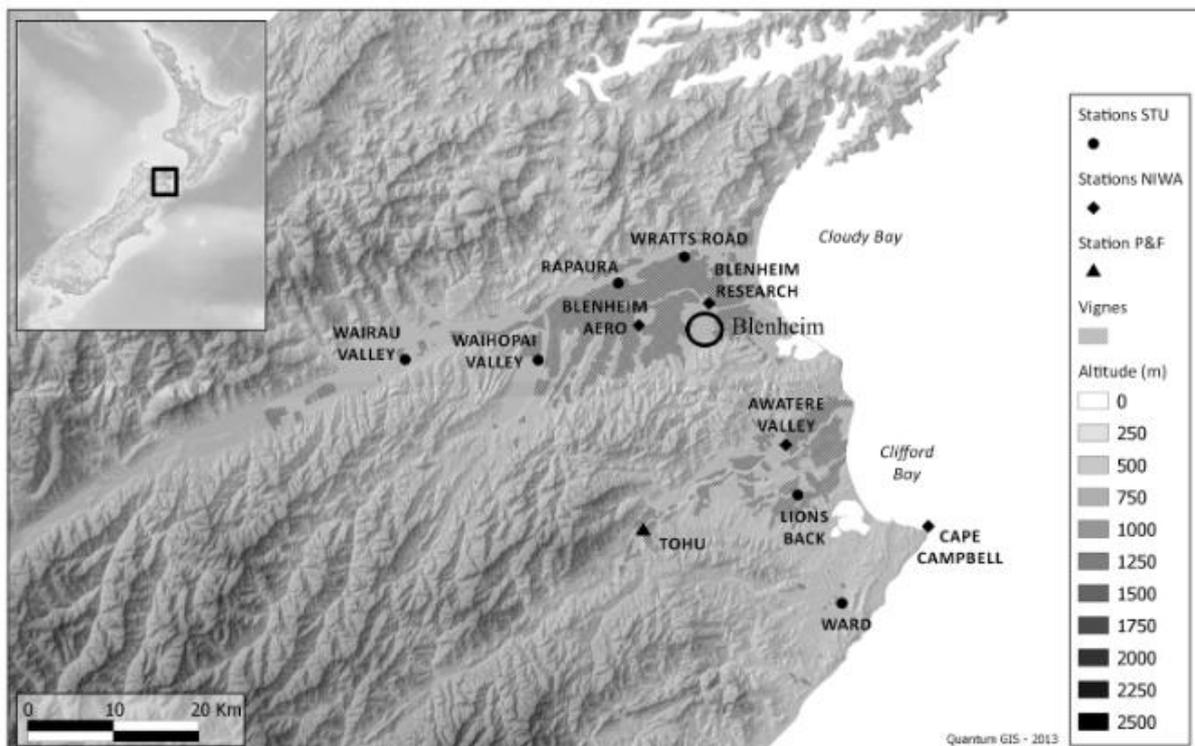


Figure 37 - Situation générale de Marlborough et des 11 stations météorologiques utilisées pour l'analyse de la variabilité spatiale entre 2008 et 2012

Source : Philippe et al., 2013

L'amplitude thermique moyenne est plus importante au fur et à mesure de l'éloignement à l'océan. Ainsi, les stations de Waihopai Valley, Wairau Valley et Tohu, plus éloignées de l'océan, enregistrent les amplitudes les plus importantes, en comparaison à Cape Campbell située à proximité immédiate de la mer (Figure 38).

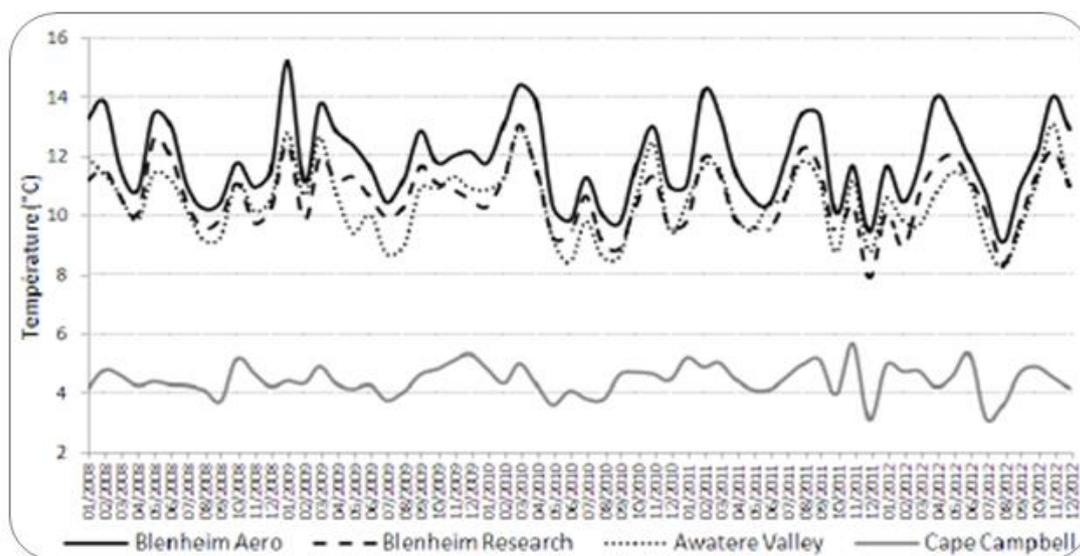


Figure 38 - Amplitudes thermiques moyennes mensuelles entre 2008 et 2012

Source : Philippe et al., 2013

Données : NIWA

A travers l'analyse des températures minimales et les jours de gel, l'étude met également en avant la variabilité spatiale des températures en relation avec la distance à la mer. Ainsi, « à l'échelle de la région de Marlborough, l'occurrences des gelées annuelles est [...] tributaire de l'éloignement à la mer à près de 50%. Le nombre de jours durant lesquels la température atteint ou descend en dessous de -2°C est également dépendant de la distance à l'océan selon un coefficient de détermination (R^2) de 0.45 » (Philippe *et al.*, 2013). De même, sur la période 2008-2012, le site de Wairau Valley a dénombré une moyenne annuelle d'une soixantaine de jours de gel ($t_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$) alors que le site de Cape Campbell ne comptabilise pas d'occurrence (Figure 39).

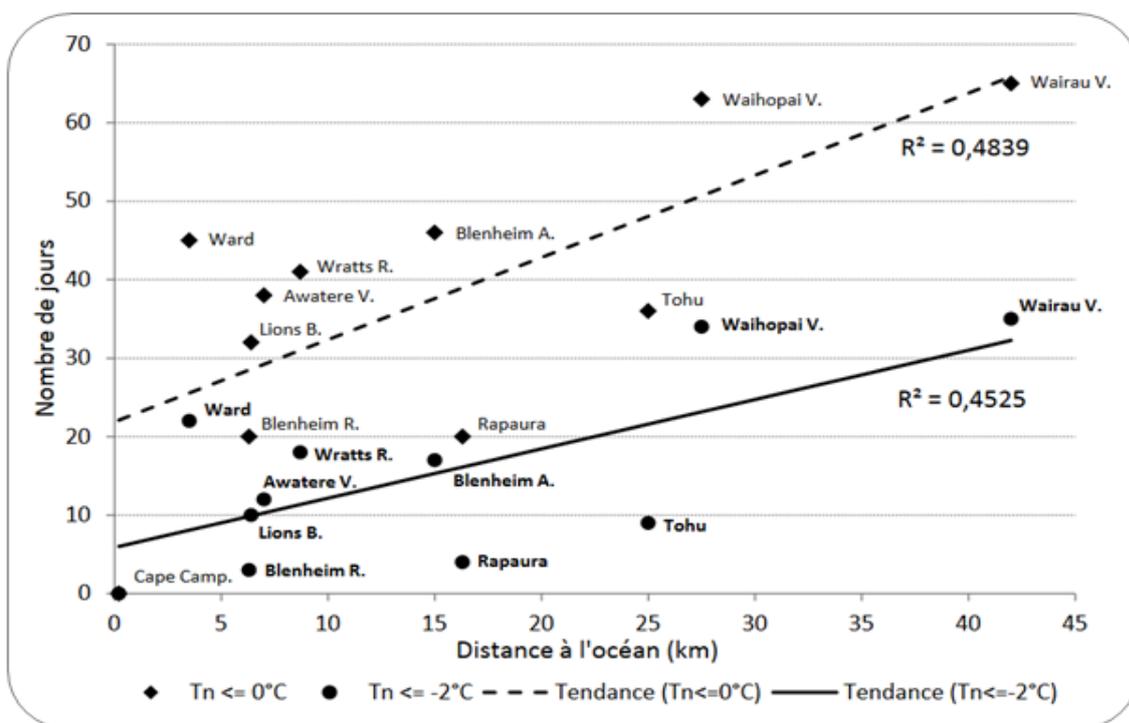


Figure 39 - Analyse bivariée entre la distance à la mer en abscisse (km) et les occurrences moyennes annuelles de gel ($^{\circ}\text{C}$, $t_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$) et de fortes gelées ($^{\circ}\text{C}$, $T_n \leq -2^{\circ}\text{C}$) entre 2008 et 2012

Source : Philippe *et al.*, 2013

Outre la distance à la mer, la topographie est un facteur permettant d'expliquer l'importante variabilité des températures. Ainsi, les différences d'exposition aux vents synoptiques ou les écoulements d'air froids durant les épisodes radiatifs (ciel clair et vent calme) sont des facteurs dépendants de la topographie mais qui engendrent de fortes disparités locales. Par exemple, les vallées de Waihopai et de Wairau sont à l'abri des vents synoptiques ce qui favorise « les situations de vents calmes et la stagnation d'air froid au niveau de la couche atmosphérique de surface » et explique les occurrences de jours de gel printanier importantes (Philippe *et al.*, 2013) (Tableau 16).

Stations	Jour de gel printanier
Wairau	10
Waihopai	8
Blenheim Aero AWS	6
Awatere Valley	6
Ward	4
Wratts Road	3
Tohu	3
Lions Back	2
Blenheim Research	1
Rapaura	1
Cape Campbell	0

Tableau 16 - Occurrences moyennes de jours de gel au printemps, sur la période 2008-2012

Source : Philippe et al., 2013

3. Modélisation des potentialités viticoles néozélandaises futures

3.1. Scénarisation

Afin de comprendre l'évolution de la viticulture en Nouvelle-Zélande, les cépages les plus représentés actuellement seront testés par le modèle MAUVE. Cette scénarisation permet de comprendre si les zones actuelles de production néozélandaises seront les régions viticoles de demain, et si les cépages d'aujourd'hui seront toujours adaptés aux conditions climatiques futures. Puisque les cépages sont généralement implantés pour une trentaine d'années, cet horizon temporel a été retenu dans la présente expérimentation. Ainsi, lorsqu'une maille est jugée suboptimale par MAUVE, elle est considérée comme exploitée pour une période de 30 ans.

3.1.1. *Modèle climatique et scénario*

Pour les différentes simulations réalisées à l'échelle de l'île du Sud, les données utilisées proviennent du jeu de données NEX-GDDP (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projection). A l'origine, le projet NEX-GDDP vise à étudier les impacts du changement climatique aux échelles régionale et locale (Thrasher *et al.*, 2022). Les projections actuelles proposées par la NIWA sont issues des simulations CMIP6, les dernières projections disponibles à ce jour. Corrigées des biais, les données NEW-GDDP-CIMP6 couvrent la période 1950-2100 (Thrasher *et al.*, 2022) avec une résolution de 0.25x0.25°, soit environ 28km², pour 4 scénarios SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.5, SSP5-8.5) et 35 GCMs (General Circulation Models). Dans cette étude, deux modèles, IPSL-CM6A-LR et ACCESS-CM2, associés aux SSP2-4.5 et SSP5-8.5, ont été utilisés. Afin de faciliter la lecture, le modèle « IPSL-CM6A-LR » sera dénommé IPSL, et le modèle « ACCESS-CM2 », ACCESS. Le SSP2-4.5 est un scénario socio-économique intermédiaire avec des émissions de GES modérées et une augmentation moyenne de la température de 2.7°C d'ici 2150. Le SSP5-8.5 est le scénario le plus pessimiste avec des émissions de GES très élevées, une augmentation moyenne de la température de 4,4°C d'ici la fin du siècle. Ce scénario suppose une économie basée sur des combustibles fossiles (Riahi *et al.*, 2016).

Pour ces deux scénarios et pour les deux modèles, les données d'humidité relative, de précipitations, de vitesse de vent et de températures (minimale, maximale et moyenne) ont été téléchargées à pas de temps journalier puis intégrées en base de données.

3.1.2. Cépages à implanter

En Nouvelle-Zélande, le Sauvignon blanc et le Pinot noir étant les variétés les plus répandues (New Zealand Wine, 2022), ils ont été retenus pour la simulation. Les cépages étant généralement implantés pour une trentaine d'années, la durée d'implantation a été fixée à 30 ans dans cette expérimentation. Comme évoqué dans le CHAPITRE 4, ce paramètre permet de verrouiller une maille durant 30 années, dès lors qu'elle est jugée suboptimale par MAUVE.

3.1.3. Définition des contraintes

Quatre types de contraintes ont été implémentées pour respecter les objectifs du scénario et tenir compte de certaines spécificités de l'île du Sud. La première est liée à la topographie qui peut être extrêmement accidentée dans certains secteurs. Compte tenu de la résolution des modèles climatiques utilisés (28 km²), la surface minimale retenue est de 5% de terres agricoles par maille. Autrement dit si une maille comporte moins de 5% de surface agricole, elle est exclue du processus de simulation. Selon la nomenclature de l'occupation des sols produite en 2020 par Landcare Research New Zealand, seules les classes relatives aux surfaces agricoles, aux vignobles ainsi qu'aux prairies ont été prises en compte dans cette expérimentation. En raison du contexte insulaire, le pourcentage de ces espaces a été calculé proportionnellement à la surface terrestre de la maille (les surfaces occupées par la mer ont donc été déduites).

La seconde contrainte est relative à la composition des sols et plus spécifiquement leurs propriétés drainantes. De nombreuses études ont en effet démontré qu'un bon drainage des sols pouvait favoriser un stress hydrique, bénéfique à la production de raisins de qualité (Huglin, 1986 ; Lazcano *et al.*, 2020 ; van Leeuwen et Seguin, 1994, 2006). Selon la classification des sols produites par Landcare Research New Zealand en 2010 (*Fundamental Soil Layers Classification*), le drainage est estimé « pour chaque sol prédéfini dans l'inventaire des ressources foncières de Nouvelle-Zélande [...], soit par des résultats d'analyses stockées dans la base de données nationales des sols, soit par des estimations professionnelles de pédologues reconnus [...] dans le domaine des sols de la région ». Seuls les sols classés « bien drainés », « drainés » ou avec un « drainage imparfait » ont été sélectionnés.

La troisième contrainte est liée à l'antériorité viticole afin de favoriser la sélection de surfaces déjà consacrée à la viticulture. Enfin, dans la perspective de limiter une potentielle fragmentation de l'espace, la quatrième contrainte impose de privilégier les voisinages d'ordre 1. Les mailles voisines de mailles suboptimales bénéficieront donc d'un bonus dans le processus d'optimisation.

3.1.4. Définition des objectifs

Trois objectifs principaux sont associés à cette expérimentation. Ils visent à optimiser des zones permettant d'atteindre une bonne maturité technique tout en minimisant l'exposition aux aléas climatique et l'usage de traitements phytosanitaires.

Le premier objectif concerne la recherche d'une maturité optimale pour les cépages Sauvignon blanc et Pinot noir. Basé sur l'indice de GSR (Parker *et al.*, 2020a), le seuil maturité idéal a été fixé à 190 mg/L pour le cas néozélandais ce qui correspond à des valeurs de 2719 degrés jours pour le Sauvignon blanc et de 2788 pour le Pinot noir.

Le deuxième objectif vise à privilégier les zones faiblement exposées aux événements climatiques comme le gel ou les vagues de chaleur qui sont de véritables enjeux pour les viticulteurs (van Leeuwen *et al.*, 2019). Comme évoqué en partie 1, même si une augmentation des températures est observée, le réchauffement n'exclut pas les périodes de gel. Au contraire, dans un contexte de changement climatique, l'avancement des stades phénologiques (Garcia de Cortazar-Atauri *et al.*, 2005 ; Ramos et Jones, 2018) expose davantage la vigne aux gelées tardives, c'est-à-dire aux épisodes de gel après le stade débourrement (Sgubin *et al.*, 2018). (Sgubin *et al.*, 2018). Dans cette expérimentation, le risque est jugé acceptable jusqu'à 3 jours par an, et la limite maximale est fixée à 5 jours par an. Cette valeur peut paraître élevée mais elle tient compte du contexte néozélandais où les événements de gel printanier peuvent être fréquents et où la plupart des vignobles exposés sont équipés de moyens de lutte contre le risque gélif (tour à vents notamment). En opposition aux épisodes gélifs, les épisodes de forte chaleur ont aussi un impact sur la vigne puisque des températures supérieures à 35°C peuvent provoquer le réchauffement et le dessèchement des baies en particulier entre la véraison et la maturité (Bonney *et al.*, 2013). Les jours de fortes chaleurs correspondent à des occurrences supérieures ou égales à 35°C, et le risque est jugé acceptable jusqu'à 4 jours par an, avec une limite maximale de 10 jours.

Le troisième objectif concerne la pression phytosanitaire (nombre de traitements potentiels au regard du risque d'exposition). Il s'agit de privilégier les zones faiblement exposées au risque pathogénique potentiel. Comme expliqué en partie 2, le modèle MAUVE calcule le nombre de traitements phytosanitaires en fonction de l'exposition aux pathogènes et du mode de production choisi. En moyenne, la durée de protection d'un produit systémique (traitement conventionnel) est de 15 jours, contre 8 pour un produit de contact (traitement biologique). C'est donc ce nombre de traitements qui sera contrôlé lors du processus d'optimisation.

Ces deux derniers objectifs tendent donc à être minimisés par le modèle afin de sélectionner les zones les moins exposées. Ainsi, plus les scores seront faibles, plus les solutions seront proches des objectifs.

3.2. Analyse de l'évolution des principaux indicateurs

3.2.1. Comparaison des modèles climatiques

Les distributions des données de températures ont été analysées et comparées pour les deux modèles et les deux scénarios associés. La Figure 40 représente la différence moyenne de températures entre les modèles IPSL et ACCESS pour le SSP2-4.5 (a), et le SSP5-8.5 (b). Sur la période historique, les données des deux modèles sont assez similaires que ce soit pour le SSP2-4.5 ou le SSP5-8.5. A court terme, des différences commencent à s'observer puis s'intensifient à moyen et long terme. Les écarts semblent toutefois plus marqués avec les températures maximales, en particulier pour le scénario SSP5-8.5. Sur le plan spatial, ces écarts de températures semblent également être plus intenses sur la zone nord, nord-ouest du site d'étude néozélandais. Au vu de ces résultats, le modèle ACCESS présente un biais chaud plus important que le modèle IPSL.

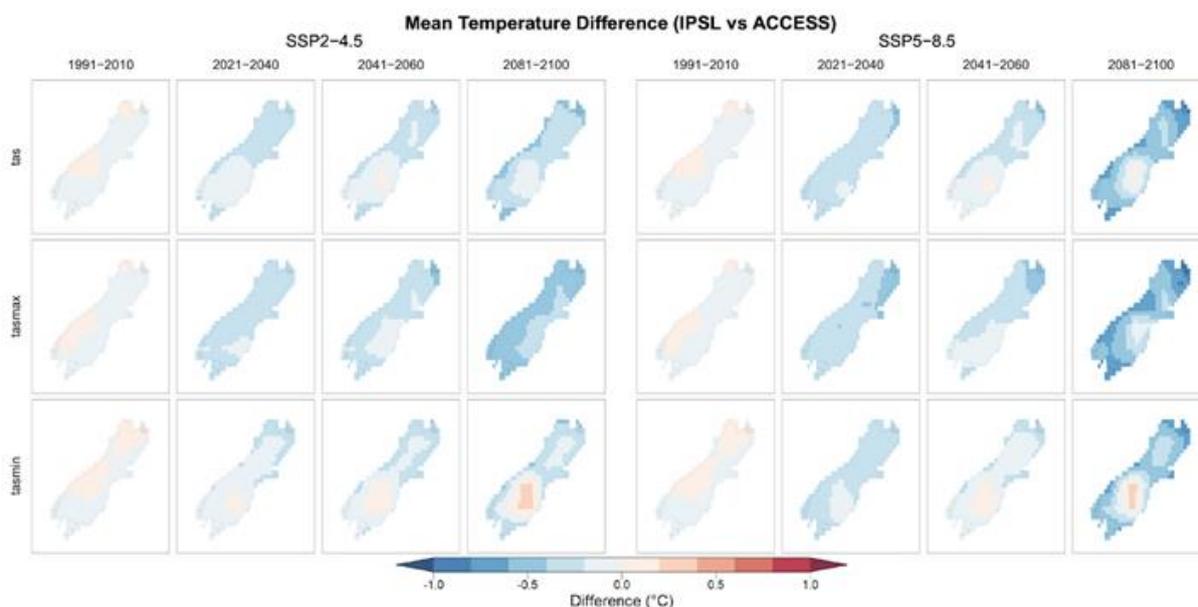


Figure 40 - Différences moyennes des températures entre les modèles IPSL et ACCESS, sur la région de Marlborough, Nouvelle-Zélande sur la période historique (1991-2010), à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long (2081-2100) terme pour les SSP2-4.5 et SSP5-8.5

tas : températures moyennes, tasmx : températures maximales, tasmin : températures minimales

Source : Hamon et al., in prep.

Afin de comprendre les biais des différents modèles et d'orienter le choix du modèle pour les simulations, des régressions linéaires peuvent être calculées entre les données simulées et les données observées (Le Roux, 2017). La régression linéaire est une approche statistique classique permettant de déterminer des relations entre des variables, quantitatives, dépendantes et explicatives. Les variables dépendantes (notées y) représentent les paramètres influencés par les variables explicatives (notées x). Dans les cas des températures observées et simulées, les variables dépendantes sont représentées par les températures simulées, et les données observées forment les variables explicatives. Le modèle linéaire suppose que toutes les variations des variables dépendantes peuvent être expliquées par une fonction linéaire impliquant les variables explicatives, telle que :

Équation 6 - Régression linéaire

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

où β_0 représente l'ordonnée à l'origine, β_1 le coefficient directeur de la droite et ε_i le terme d'erreur

La régression linéaire est calculée entre les données observées par les différentes stations météorologiques, et les données simulées par les deux modèles. Afin de pouvoir comparer les températures moyennes des modèles ACCESS et IPSL, des températures moyennes observées de 11 stations météorologiques ont été téléchargées sur le site de la NIWA (Figure 40). Les données proviennent des régions de Nelson, Marlborough et Canterbury, avec une résolution temporelle quotidienne couvrant les années de 2010 à 2012. Les températures moyennes observées sont comparées avec la maille correspondante aux modélisations. Dans la région de Christchurch, deux stations météorologiques sont implantées sur une maille ; ainsi, pour cette maille (605), les données observées ont été agrégées.

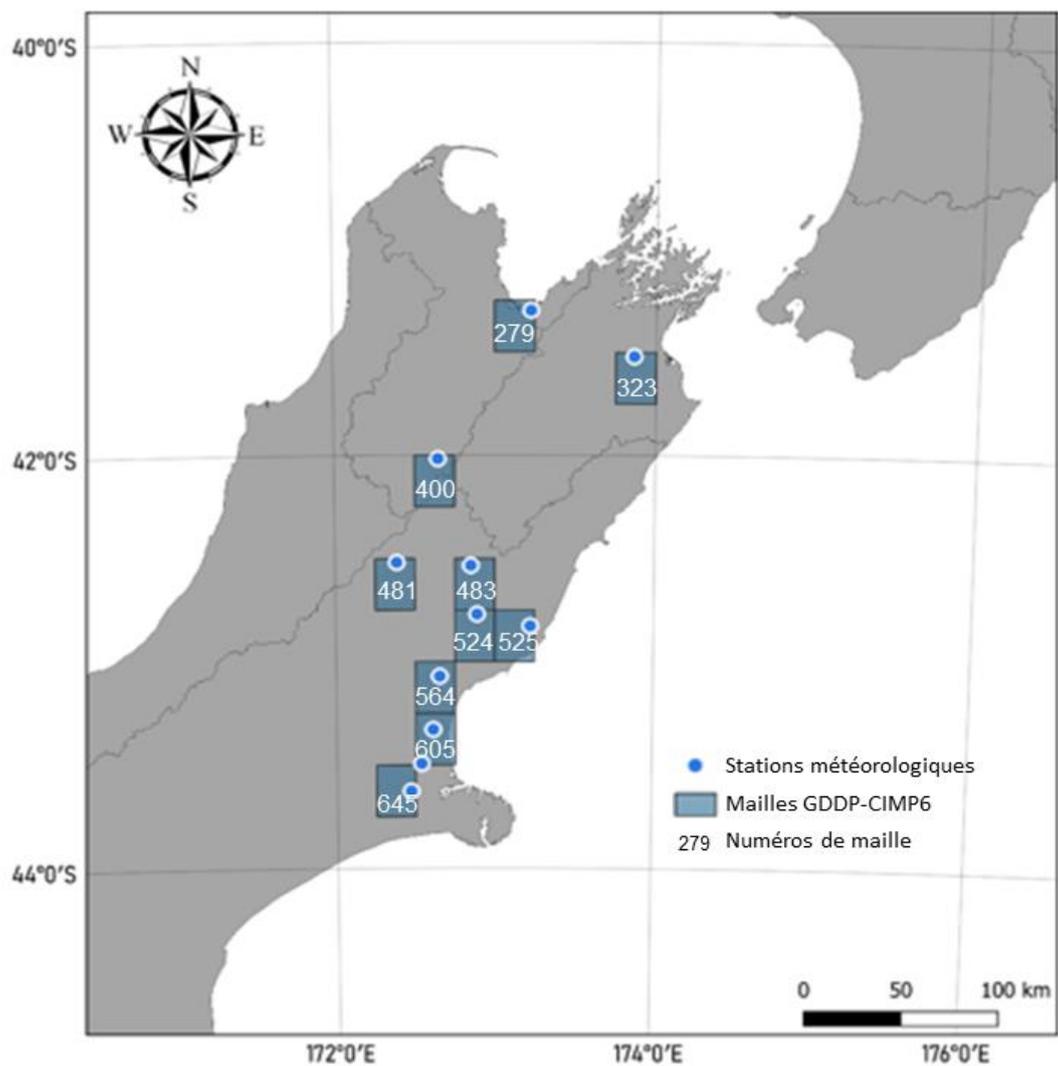


Figure 41 - Localisation des stations météorologiques en Nouvelle Zélande par rapport au maillage climatique

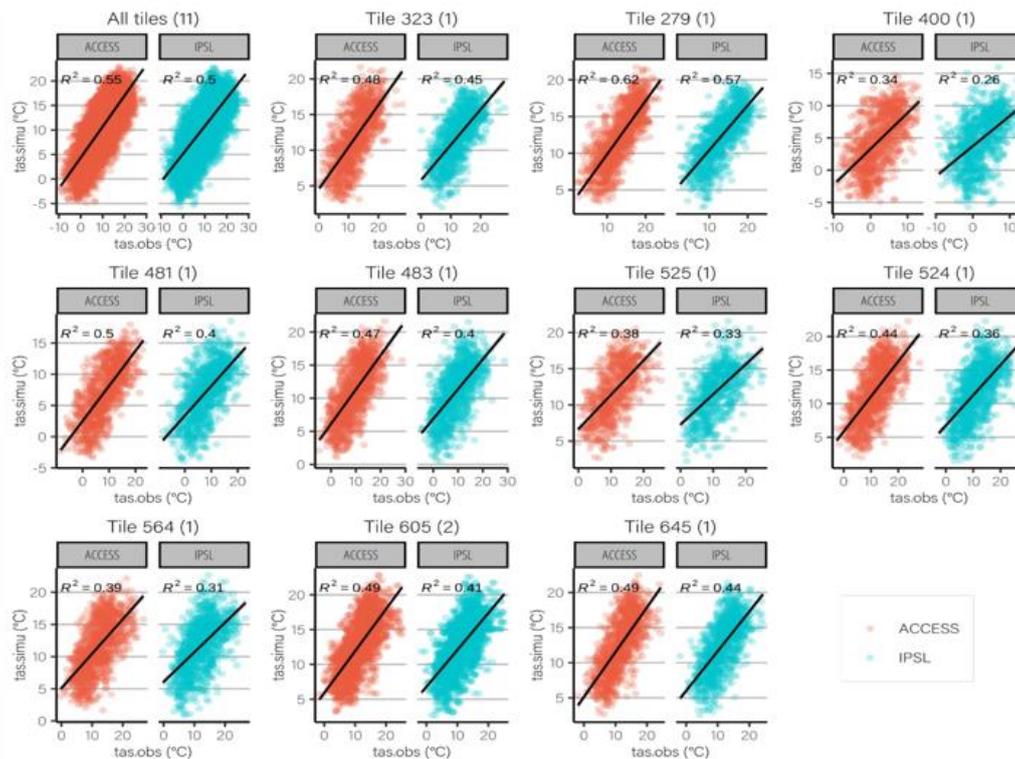


Figure 42 - Comparaison des températures moyennes des modèles ACCESS (rouge) et IPSL (bleu) avec les températures observées de 11 stations météorologiques de Nouvelle-Zélande.

Source : Hamon et al., in prep.

Les nombres entre parenthèses représentent le nombre de stations utilisé pour la comparaison d'une maille des modèles

Afin de déterminer le modèle le plus adapté à la zone d'étude, le coefficient de détermination (ou R^2) est calculé pour chaque maille et chaque modèle (Figure 42). Le R^2 , ou coefficient de détermination, permet de juger de la qualité d'une régression linéaire. Cet indicateur exprime la proportion de variance d'une variable dépendante par rapport à la variable explicative. Exprimé en pourcentage, ou plus communément entre 0 et 1, plus l'indicateur est élevé, plus la variance de la variable dépendante (ici les données de températures simulées) est expliquée par la variance de la variable explicative (les données observées). Ainsi, plus le coefficient de détermination est élevé, plus les données simulées se rapprochent des données observées.

De manière générale, pour l'ensemble des mailles, le R^2 le plus élevé est associé au modèle ACCESS, ce qui signifie que les températures moyennes de ce modèle sont plus proches des températures moyennes observées des stations, que le modèle IPSL. Pour cette raison, ce modèle sera choisi dans les simulations qui vont suivre.

Cependant, les R^2 peuvent apparaître relativement faibles en particulier sur les mailles 400, 525 et 564 (respectivement 0.340, 0.38 et 0.39 pour le modèle ACCESS). Il semble nécessaire de

rappeler que la résolution des mailles est de l'ordre de $0.25 \times 0.25^\circ$, soit un peu moins d'une trentaine de kilomètres. Sur une telle surface (784 km², soit 8 000 ha), les facteurs locaux ne sont pas pris en compte. Or, comme évoqué en première partie, les facteurs locaux tels que la topographie, influencent considérablement les températures. Or, la Nouvelle-Zélande, et notamment la région de Marlborough, possèdent un relief particulièrement accidenté. Pour la maille 400 par exemple, l'élévation moyenne est de 1400m, mais la topographie réelle est encore plus marquée puisque l'emprise de la maille couvre un espace montagneux. Dans une telle configuration, la résolution du maillage entraîne un lissage des températures modélisées.

3.2.2. Evolution de l'indice héliothermique de Huglin

Afin de mieux comprendre l'évolution climatique de l'île du Sud, l'indice de Huglin a été calculé par le modèle pour toutes les années de simulation disponibles pour les deux SSP (Figure 43). La comparaison des valeurs obtenues montre que la période historique et le court terme sont assez similaires. L'île du Sud est majoritairement classifiée comme « très fraîche » selon l'indice de Huglin. Une évolution des côtes nord et ouest est observée à court terme pour un climat « frais », notamment dans les régions de Marlborough, Canterbury et Waipara.

Les deux scénarios montrent un glissement vers des classes plus tempérées à moyen terme en particulier pour le SSP5-8.5. De la même manière, à long terme, l'expansion de la zone « tempérée » augmente pour les deux SSP. Le SSP5-8.5 comptabilise également des mailles considérées comme « tempérées chaudes ». De manière générale, une évolution des classes « très fraîches » et « fraîches » s'opèrent pour des classes plus « tempérées » à moyen terme, voire « tempérées chaudes » sur du long terme. Les évolutions sont principalement localisées sur les côtes nord et ouest, puis sur tout le pourtour nord et les côtes est et ouest de l'île du Sud. Les régions intérieures du nord de l'île jusqu'à la côte sud-est semblent plus résistantes à cette évolution ; ceci s'explique par la présence du massif montagneux dont la topographie influence considérablement les températures.

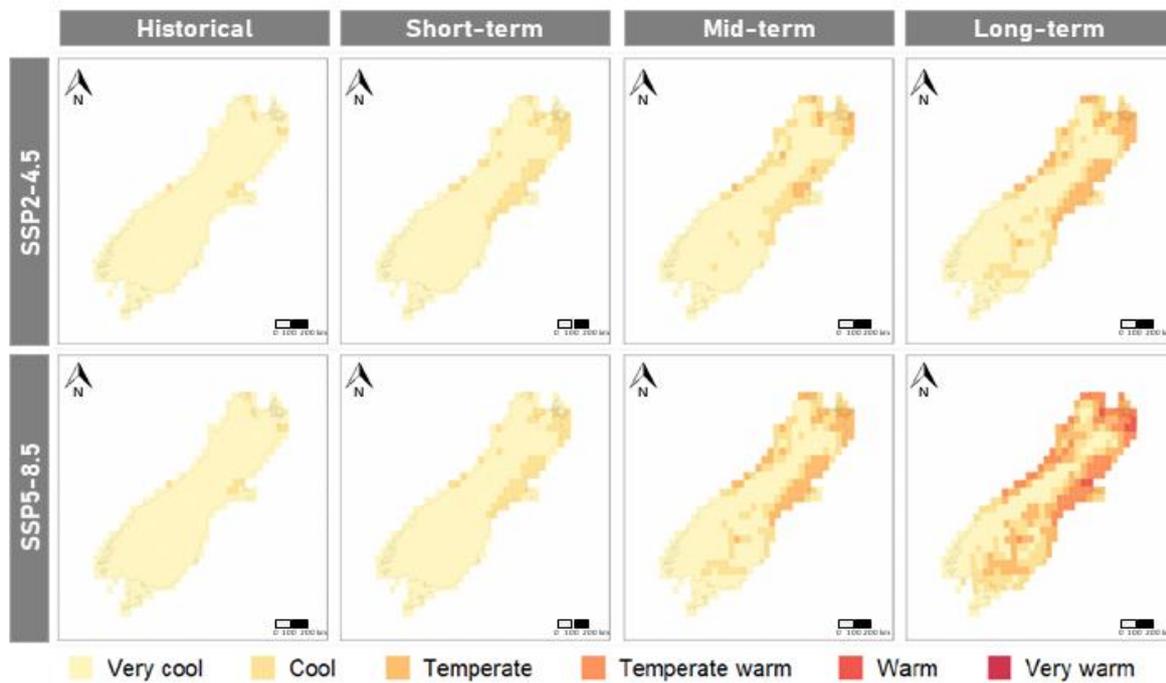


Figure 43 - Indice de Huglin sur la période historique (1+51-2010), à (1991-2010), à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long (2081-2100) terme pour la région de Marlborough

Source : Hamon *et al.*, in prep.

3.2.3. Le risque d'évènements climatiques extrêmes

Malgré une évolution des classes climatiques « fraîches » vers de classes plus tempérées, l'île du Sud reste très exposée aux épisodes de gel ($\leq 0^{\circ}\text{C}$). La Figure 44 met en avant la fréquence d'années gélives entre la date de débourrement et la maturité technique (190 mg/l atteint avant le 15 avril). Sur les deux scénarios, une nette évolution est observée. Celle-ci est à mettre en relation avec l'avancée des stades phénologique et notamment le débourrement. En effet, l'augmentation des températures entraîne une avancée de la date de débourrement lors des mois où le risque de gel est encore important. Les résultats mettent également en évidence un risque de gel plus faible sur l'ensemble de la frange littorale.

Concernant les vagues de chaleurs ($\geq 35^{\circ}\text{C}$), aucune occurrence n'est présente quel que soit le scénario et l'horizon temporelle retenu. Ce constat peut sembler surprenant sachant que l'île du Sud a déjà connu des épisodes de vagues de chaleur dans le passé. L'effet de lissage lié à la résolution du modèle climatique utilisé est un facteur d'explication potentiel de ce résultat.

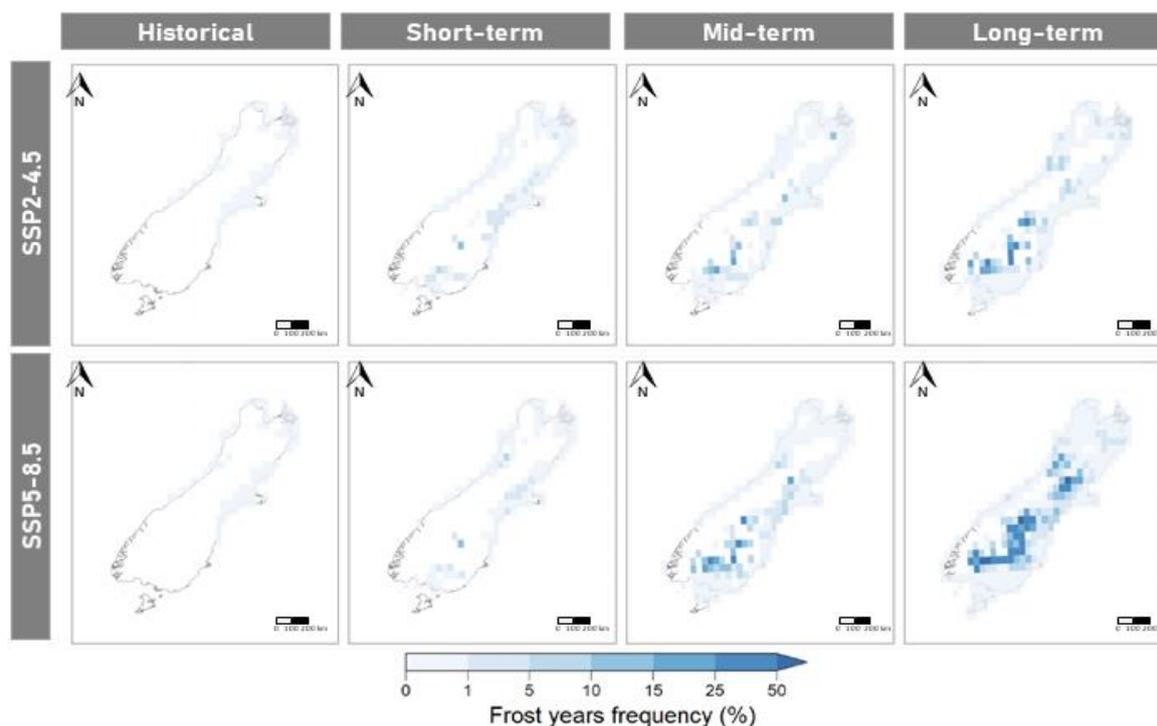


Figure 44 - Fréquence d'année gélives (%) entre le débourrement et la maturité technique supposée, sur la période historique (1991-2010), à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long (2081-2100)
Source : Hamon et al., in prep.

3.3. Résultats d'optimisation

Les cartographies présentées en Figure 45 et Figure 46 représentent les meilleures combinaisons entre les objectifs et les contraintes fixés dans le scénario implémenté pour guider l'expérimentation menée à l'échelle de l'île du Sud. Si une maille n'est pas classée comme étant une solution suboptimale, cela ne signifie pas que la maille n'est pas adaptée à la viticulture, mais simplement que le compromis entre les objectifs et les contraintes n'est pas aussi bon qu'une maille suboptimale. De manière générale, les zones suboptimales sont principalement situées sur le littoral nord, est et ouest. Les mailles les mieux classées se localisent majoritairement sur la partie est de l'île à partir du moyen terme, quel que soit le cépage ou le scénario. Entre les deux cépages, la principale différence mise en évidence par le modèle MAUVE est relative à l'extension spatiale plus importante et plus rapide du Pinot noir par rapport au Sauvignon blanc (Figure 45).

A court terme, le Pinot noir semble principalement adapté sur la côte est dans les régions de Canterbury et Waipara et sur la côte nord dans la région de Marlborough et Nelson ; la région de Marlborough semble plus favorable à ce cépage avec le SSP5-8.5. Bien que l'implantation

du Sauvignon soit également bien présente autour de Waipara et Canterbury, les côtes nord et est de l'île apparaissent moins adaptées en comparaison au Pinot.

A moyen terme, si les superficies adaptées au Sauvignon semblent stables, les mailles jugées suboptimales pour le Pinot noir croissent considérablement. L'expansion se fait le long de la côte est et à proximité de Central Otago dans les deux scénarios. A long terme, l'expansion se poursuit vers l'intérieur des terres. Dans le cas du Sauvignon blanc, cette évolution vers la côte ouest et vers l'intérieur de l'île se fait sur le long terme, alors qu'à cette période, le Pinot noir couvre la quasi-totalité de l'île du Sud à l'exception des Alpes du Sud.

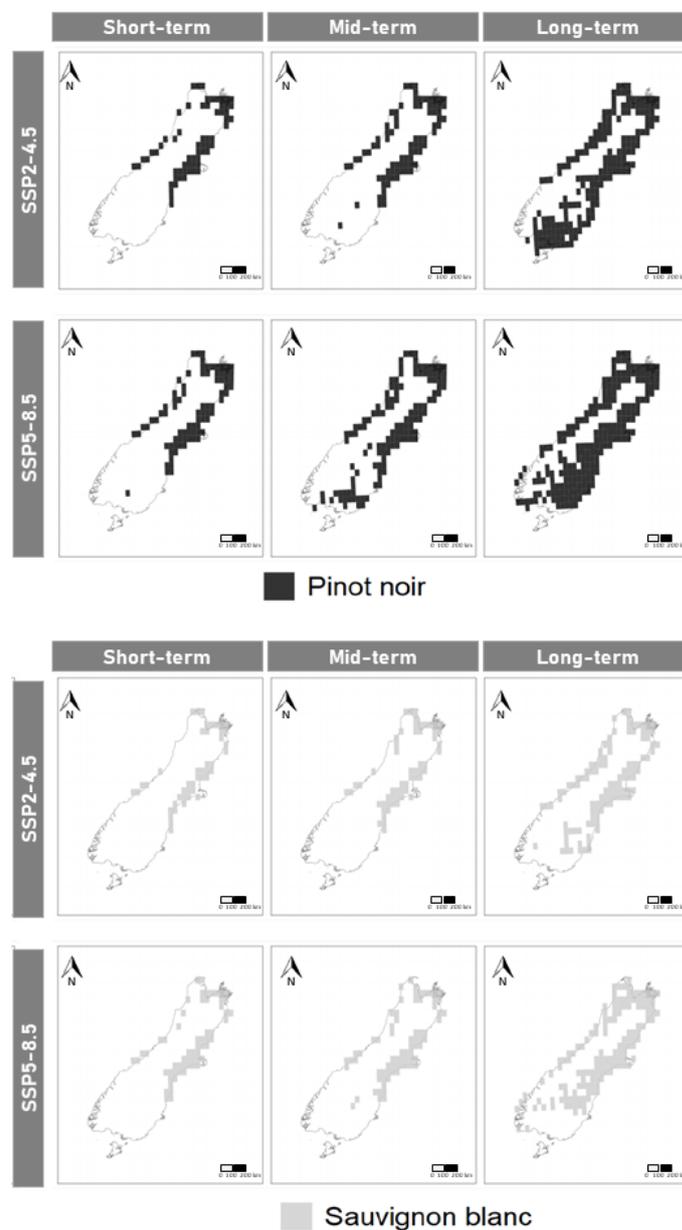


Figure 45 - Résultats suboptimaux pour l'implantation du Pinot noir (noir) et du Sauvignon blanc (gris) à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long terme (2081-2100)

Source : Hamon et al., in prep.

Enfin, les résultats suboptimaux relatifs à un choix entre les deux cépages montrent que le Sauvignon blanc constitue une meilleure solution à l'échelle de l'île du Sud à court et moyen terme (Figure 46). Ce constat est bien visible sur la côte proche de Nelson, Marlborough et Canterbury. A plus long terme, les zones en faveur de Pinot noir augmentent notamment vers l'intérieur de l'île, et vers le sud dans le cas du scénario SSP5-8.5. La comparaison des simulations individualisant ou combinant les deux cépages montre des différences dès le moyen terme et plus importantes à long terme quel que soit le SSP retenu.

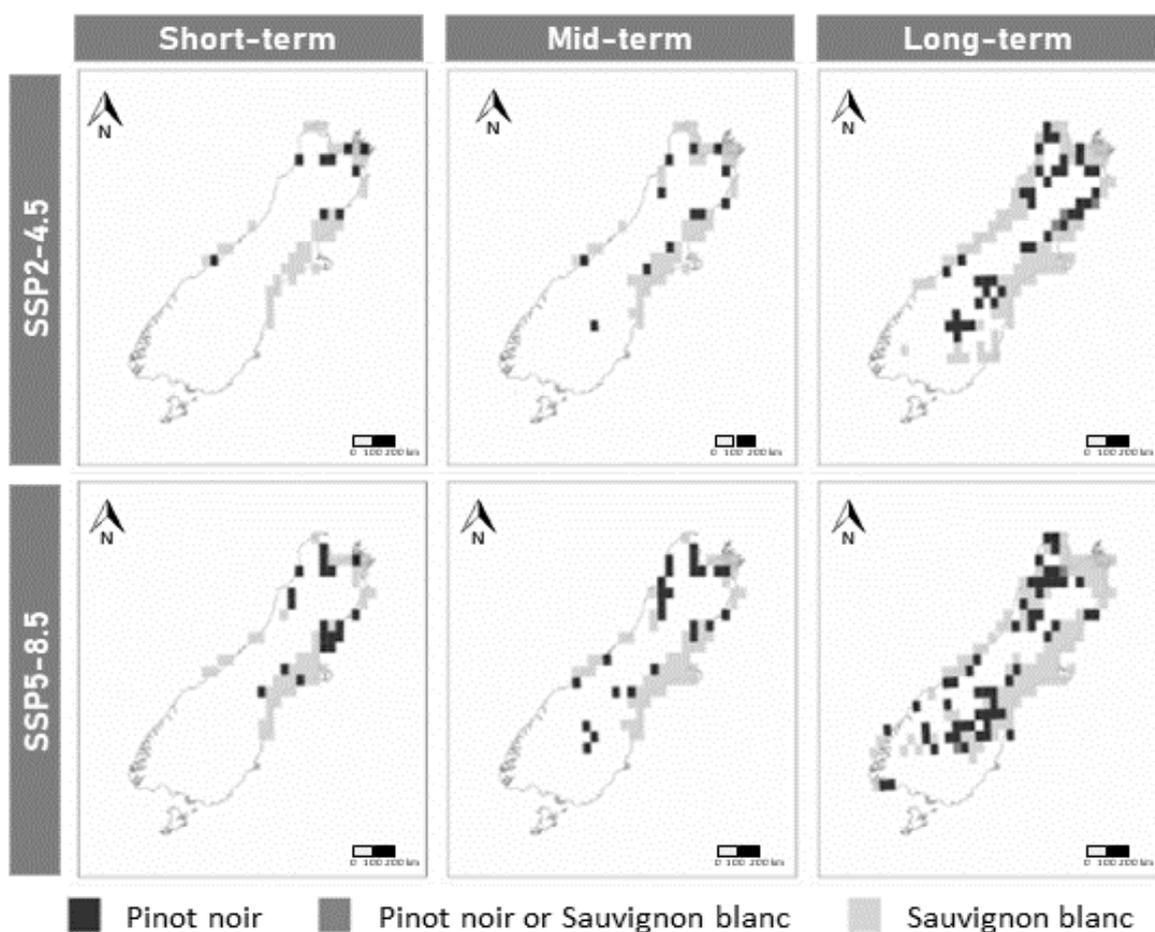


Figure 46 - Résultats suboptimaux pour l'implantation du Pinot noir ou du Sauvignon blanc à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long terme (2081-2100)

4. Conclusion de chapitre

La Nouvelle-Zélande est un pays dont les produits viticoles rayonnent à échelle internationale. 16^{ème} producteur de vin au monde en 2022, la Nouvelle-Zélande est également un des seuls pays producteurs à connaître une augmentation de ses exportations, tant en volume qu'en valeur par rapport à 2021 (OIV, 2023). La production est majoritairement représentée par du Sauvignon blanc qui représente plus de 60% de l'encépagement total du pays, et par du Pinot noir (14%). Avec une telle prédominance de Sauvignon blanc, il convient de se demander si ce cépage sera toujours adapté aux conditions climatiques futures, et s'il sera encore possible de produire la même qualité et le même style de vin qu'aujourd'hui ? Afin de répondre à ces deux problématiques, le modèle MAUVE a été utilisé à l'échelle de l'île du Sud. Les objectifs de cette étude étaient d'évaluer l'évolution des risques climatiques et la phénologie des cépages emblématiques du pays ainsi que de simuler la durabilité des vignobles actuels dans des conditions climatiques futures en identifiant les zones les plus favorables à la viticulture.

Pour cela, les projections de deux modèles climatiques ont été comparées. Des différences significatives à propos des températures minimales, maximales et moyennes ont été démontrées, que ce soit entre les modèles, les scénarios ou les périodes de temps. Bien que le modèle ACCESS semble plus proche des données observées à l'île du Sud, il est important de souligner que la résolution disponible ne permet pas de prendre en compte la variabilité locale du climat et en particulier l'effet de la topographie sur les températures.

Les simulations réalisées à l'échelle de l'île du Sud ont permis d'appréhender l'impact du changement climatique sur les vignobles actuels et d'identifier l'évolution des zones viticoles suboptimales. Plusieurs études permettent de confirmer les résultats obtenus par le modèle MAUVE notamment sur le réchauffement attendu (Pearce *et al.*, 2018) et sur l'avancée probable des stades phénologiques clés (Ausseil *et al.*, 2021). En combinant différents objectifs et contraintes la démarche d'optimisation a permis de fournir des solutions suboptimales relatives à l'implantation du Sauvignon blanc et du Pinot noir. A la lumière des résultats obtenus, la région de Marlborough devrait continuer à être l'une des zones viticoles les plus importantes de l'île du Sud, tant pour le Sauvignon blanc que le Pinot noir, qu'importe le scénario climatique. Cette analyse est concordante avec celle établie par Vetharaniem *et al.* (Vetharaniem *et al.*, 2022). A l'échelle de l'île du Sud, les vignobles néozélandais les plus proches du littoral semblent plus adaptés aux conditions futures, principalement le long de la côte est jusqu'à moyen terme, et sur l'ensemble du littoral à long terme.

CHAPITRE 6

Analyse de l'émergence potentielle de zones viticoles suboptimales en Bretagne, France

Ce sixième chapitre expose une expérimentation du modèle MAUVE à l'échelle de la Bretagne en tant que région viticole émergente. Dans un premier temps, les contextes viticoles historiques et actuels sont présentés. Dans un second temps l'analyse du contexte climatique met en évidence la diversité et les enjeux de la région. Dans une dernière partie, plusieurs simulations conduites à l'échelle régionale et à l'échelle locale viseront à répondre à plusieurs questions associées au renouveau de la viticulture bretonne :

- *Quelles sont les zones les plus optimales pour accueillir de nouveaux vignobles dans le futur ?*
- *Les îles et le littoral constituent-ils des espaces préférentiels à l'échelle régionale ?*
- *Comment appréhender les conditions d'intégration de ces nouveaux vignobles à l'échelle locale ?*

SOMMAIRE DE CHAPITRE

1. LE CONTEXTE VITICOLE BRETON.....	166
2. LE CONTEXTE CLIMATIQUE BRETON.....	169
2.1. CONTEXTE CLIMATIQUE REGIONAL.....	169
2.2. CONTEXTE CLIMATIQUE LOCAL.....	171
3. MODELISATION DES POTENTIALITES VITICOLES FUTURES A L'ECHELLE DE LA REGION BRETAGNE.....	179
3.1. SCENARISATION.....	179
3.1.1 <i>Modèle climatique et des scénarios associés.....</i>	<i>179</i>
3.1.2 <i>Choix de cépages.....</i>	<i>180</i>
3.1.3 <i>Définition des contraintes.....</i>	<i>181</i>
3.1.4 <i>Définition des objectifs.....</i>	<i>181</i>
3.2. ANALYSE DE L'EVOLUTION DES POTENTIALITES VITICOLES BRETONNES FUTURES.....	182
3.2.1 <i>Bilan héliothermique.....</i>	<i>182</i>
3.2.2 <i>Le risque d'évènements climatiques extrêmes.....</i>	<i>183</i>
3.3. RESULTATS DE L'OPTIMISATION.....	186
4. EXPERIMENTATION A PLUS HAUTE RESOLUTION.....	188
4.1. SCENARISATION.....	188
4.2. RESULTATS DE L'OPTIMISATION.....	190
5. CONCLUSION DE CHAPITRE.....	192

Avant-propos - Le chapitre présenté ci-après traite de la viticulture en région Bretagne. Si la Bretagne historique comprend 5 départements (Côtes-d'Armor, Finistère, Ille-et-Vilaine, Loire-Atlantique et Morbihan), la région Bretagne actuelle telle qu'elle est définie par la loi du 5 juillet 1972 comptabilise 4 départements (Côtes-d'Armor, Finistère, Ille-et-Vilaine et Morbihan). Dans un souci de simplification de lecture, le terme « Bretagne » est privilégié et sous-entend des limites géographiques mouvantes en fonction des dates : « Bretagne historique » avant 1972, et « région Bretagne » à partir de 1972.

1. Le contexte viticole breton

La viticulture est attestée sur le territoire breton jusqu'au début du XX^{ème} siècle. Même si la culture de la vigne est certainement antérieure au Moyen-Âge, c'est au début de cette période que sont recensés les plus anciens documents faisant référence à la vigne en Bretagne (Bachelier, 2020 ; Saindrenan, 2011). En effet, pour des besoins religieux (vin de messe), le clergé a contribué à l'implantation et à l'entretien de la vigne dans des lieux où cette plante n'était pas cultivée (Bachelier, 2020 ; Saindrenan, 2011).

Historiquement composée de 5 départements (Finistère, Côtes-d'Armor, Ille-et-Vilaine, Morbihan, Loire-Atlantique), la Bretagne comptait 5 vignobles principaux selon des documents d'archives : le vignoble de Rhuys, du Val de Rance, de Redon, de Guérande et le vignoble nantais (Figure 47). Ainsi, le vignoble de Rhuys s'étendait sur la région vannetaise actuelle, celui du Val de Rance dans les régions de Dinan et Saint-Malo, celui de Redon à la jonction des départements de l'Ille-et-Vilaine, du Morbihan et de la Loire-Atlantique, celui de Guérande en Loire-Atlantique et enfin le vignoble nantais sur quasiment l'ensemble du département de Loire-Atlantique.

A ce stade, il convient de préciser que le terme « vignobles » tel qu'il est présenté en Figure 47, qualifie une région où la culture de la vigne est dédiée à la production de vin. Cette culture pérenne a également « marqué les paysages et la toponymie locale » (Saindrenan, 2011). De nombreux « petits vignobles »¹⁵ tels qu'ils sont décrits par Le Bras témoignent d'une présence importante de la vigne en particulier entre le IX^e et le début du XIV^e siècle en Bretagne (Bachelier, 2020 ; Le Bras, 2017). Preuve de cette culture omniprésente et influente, Bachelier dénombre près de 110 lieux associés à des vignes en Haute-Bretagne¹⁶ sur cette période (Bachelier, 2020). En pays gallo, Saindrenan confirme que les « mentions relatives à la vigne

¹⁵ Vignoble de petite taille et de petite production, mais pas nécessairement de faible réputation

¹⁶ Haute-Bretagne : partie orientale et gallésante de la Bretagne, comprenant l'Ille-et-Vilaine, la Loire Atlantique, la moitié est du Morbihan et la moitié est des Côtes-d'Armor.

sont [...] nombreuses, plus encore qu'en pays bretonnant et moins sujettes à interrogations » (Saindrenan, 2011). La vigne a ainsi très probablement été cultivée en dehors de ces espaces géographiques, mais à des buts privés et/ou à moindre densité.

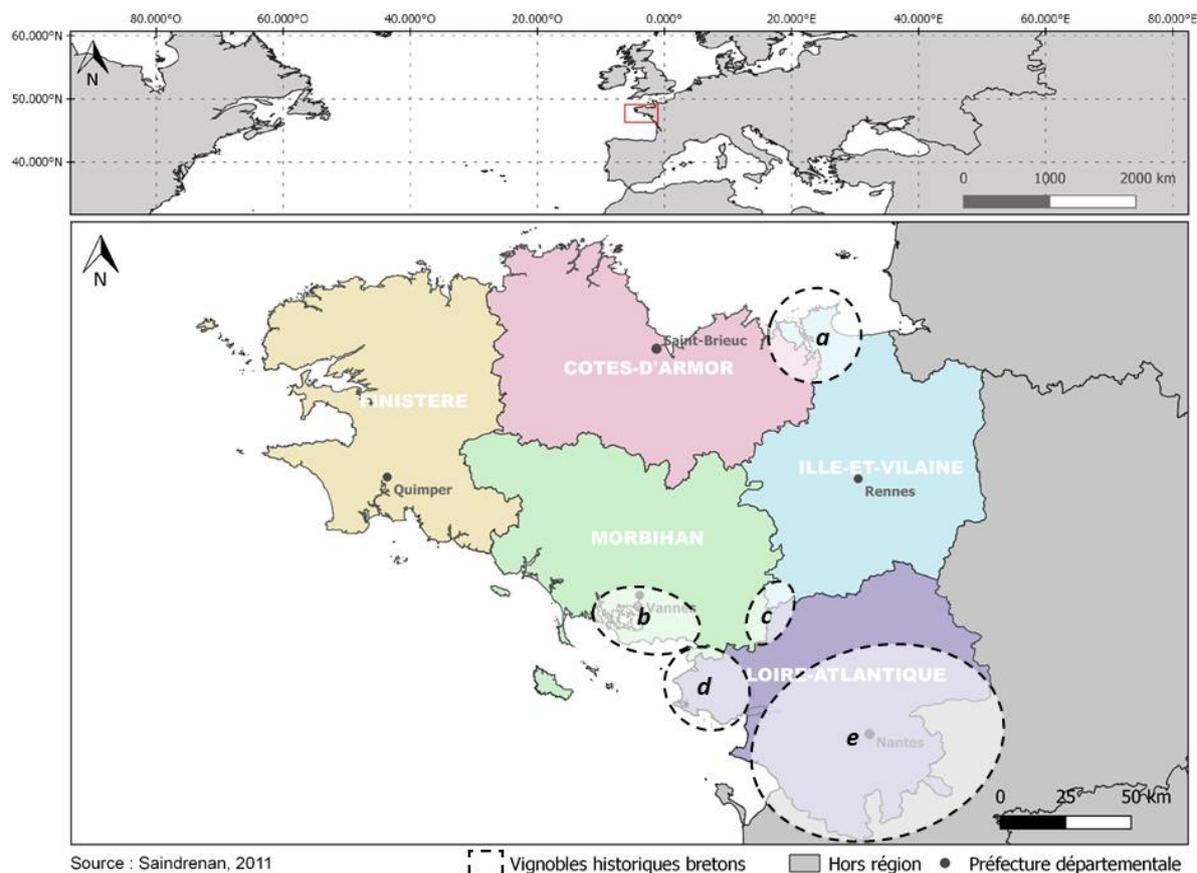


Figure 47 - Les principaux vignobles historiques de la Bretagne - a) vignoble du Val de Rance ; b) vignoble de Rhuys ; c) vignoble de Redon ; d) vignoble de Guérande ; d) vignoble nantais
Adaptée de Saindrenan, 2011

A partir du XII^e siècle, le vin devient un bien de consommation courant avec l'accroissement démographique et la concentration des populations dans les villes (Bachelier, 2020). Pourtant, vers la fin de ce siècle, et de façon plus marquée au XIII^e siècle, les surfaces des vignobles septentrionaux diminuent. En effet, avec l'évolution de la navigation atlantique, les exportations de vins par voies maritimes sont plus aisées et fréquentes. Cette nouvelle source d'approvisionnement profite aux vignobles du sud-ouest ; à titre d'exemple, Roger Dion¹⁷ a calculé qu'entre le 1^{er} octobre 1482 et le 30 septembre 1483, 160 bateaux ont assuré l'approvisionnement en vin des bretons, uniquement à partir du port de Bordeaux (Saindrenan,

¹⁷ Roger Dion : géographe et historien français, né en 1896 et décédé en 1981 (Broc, 1982)

2011). Ces importations n'assurent qu'une partie de la consommation de la Bretagne, et les 5 principaux vignobles orientaux de la région sont peu affectés.

En 1731, de peur des disettes causées par une surproduction viticole au détriment des cultures de céréales, Louis XV interdit de planter de nouvelles vignes par arrêté. En Bretagne, cette interdiction daterait même de 1701 (Saindrenan, 2011). Puis, les maladies successives font baisser la production et la culture de la vigne : d'abord l'oïdium (1847), le mildiou (1878) et enfin, le phylloxera à la fin du XIXe siècle. L'ensemble de la viticulture française est profondément touché par l'invasion parasitaire du phylloxera. Les vignobles bretons se remettent difficilement de ce fléau, et les vignobles de Rhuys, Redon et Guérande planteront des plants d'hybrides pour reconstituer leurs vignobles. La commercialisation et la plantation de ces plants seront interdites en 1934, et la promulgation d'une loi sur l'arrachage de ces hybrides fera disparaître ces vignobles à partir de 1955 (Saindrenan, 2011).

Si la Bretagne renvoie l'image d'une région bocagère et d'un système polyculture-élevage plutôt que d'une région viticole, la vigne réapparaît depuis la fin du XXème. Dès le début des années 2000, la vigne bretonne se développe, en partie, grâce à des associations comme l'Association pour la Reconnaissance des Vins Bretons (ARVB) (Bonnardot et Quénot, 2020). Ainsi, en 2020, l'ARVB recensait 19 vignes associatives en exploitation (et 5 en projet), 42 privées (et 15 en projet) et 12 professionnelles (et 33 en projet), à l'échelle de la région Bretagne. Ce développement a également été facilité par le décret n°2015-1903 de 2016, autorisant l'implantation de vignes à des buts commerciaux, sans indication géographique (Bonnardot et Quénot, 2020). Les surfaces autorisées sont limitées à 1% de la superficie en vignes nationales totale, plantée au 31 juillet de l'année précédente. Ce décret a favorisé l'implantation de vignobles commerciaux en Bretagne, à tel point qu'une branche de l'ARVB dédiée aux viticulteurs professionnels a été créée en 2021 : l'Association pour les Vignerons Bretons (AVB). Actuellement, différents cépages sont présents sur le territoire : des cépages internationaux (Chardonnay, Chenin, Cabernet franc, etc.), nationaux (Savagnin, Grolleau, Pinot d'Aunis, etc.), historiques (Berligou, Gros-plant) ou hybrides (Solaris).

Dans cette région à l'identité très marquée, le renouveau viticole passe par l'identification des potentialités agroclimatiques pour la culture de la vigne. Cette étape renvoie également à l'identification des cépages adaptés aux différentes configurations rencontrées.

2. Le contexte climatique breton

2.1. Contexte climatique régional

L'augmentation des températures et des épisodes de fortes chaleurs observées depuis les années 2000 (Duchêne et Schneider, 2005 ; Jones et Davis, 2000 ; Schultz, 2000 ; Seguin et Garcia de Cortazar, 2005) pourrait être bénéfique pour la culture de la vigne en Bretagne qui jouit d'un climat océanique frais (Bonnardot *et al.*, 2022). D'un point de vue uniquement climatique, la Bretagne apparaît ainsi comme un territoire émergent pour la viticulture (Bonnardot et Quéno, 2020 ; Hannah *et al.*, 2013 ; Malheiro *et al.*, 2010 ; Petitjean *et al.*, 2022 ; Thibault *et al.*, 2022). Un rapide bilan thermique réalisé sur la période 1951-2020 à l'échelle de la région Bretagne (Figure 48) confirme ce constat global (Bonnardot *et al.*, 2022).

A l'image de toutes les régions du monde (Jones *et al.*, 2012a ; Schultz, 2000), un décrochage des températures est observé à partir des années 1980 pour l'ensemble des stations bretonnes (Bonnardot *et al.*, 2022). Si cette augmentation est variable dans le temps et dans l'espace, l'étude souligne qu'en comparant les températures moyennes de la période 1991-2020 et 1961-1990, « un écart d'au moins 1°C en moyenne annuelle est enregistré au centre (Rostrenen) et à l'est de la région (Dinard et Rennes) ». Cet écart est plus conséquent durant les saisons printanière et estivale (+1.23°C et +0.9°C en moyenne pour l'ensemble des stations), même si l'augmentation des températures est moins importante sur les stations ouest (Brest, Quimper, Lorient) (Figure 48).

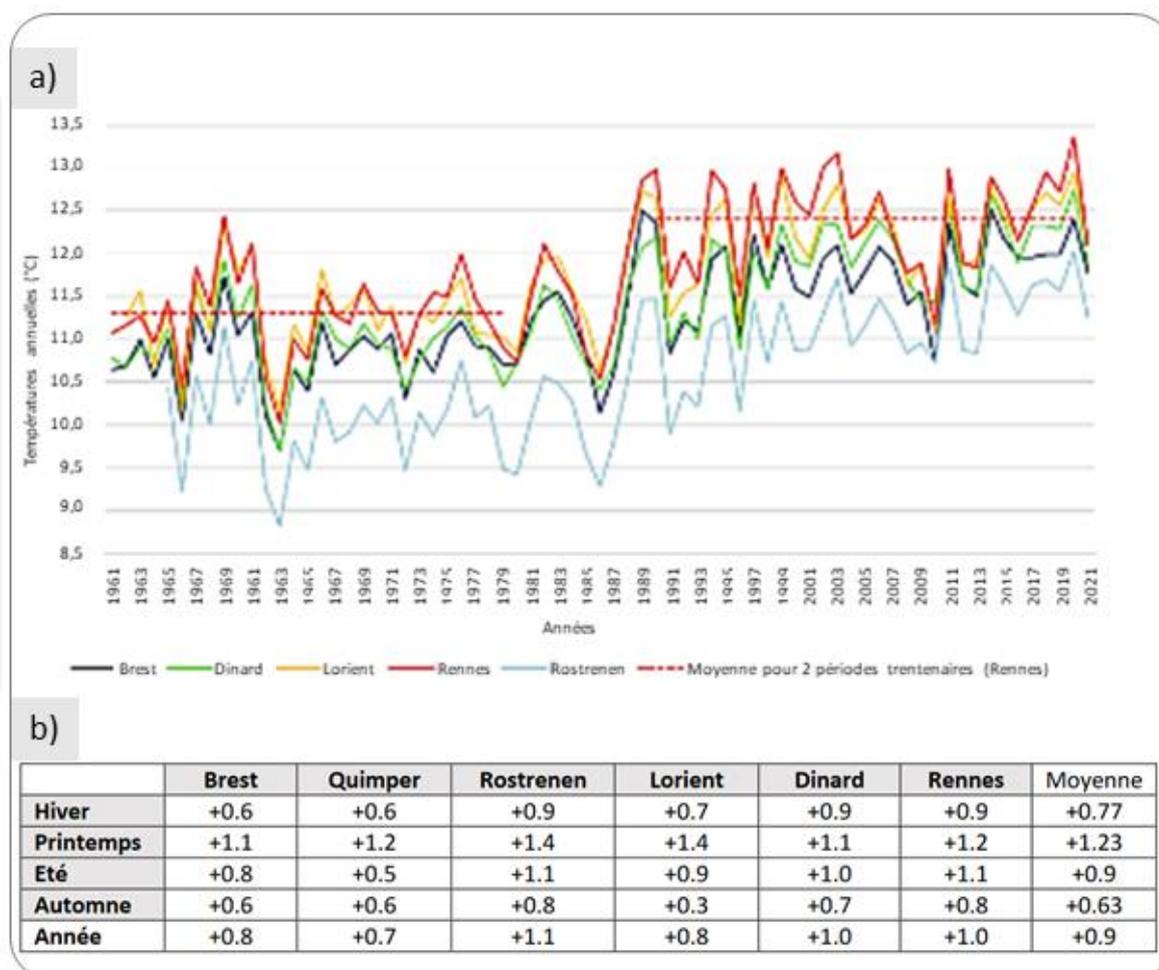


Figure 48 - a) Températures moyennes annuelles (°C) pour les stations de Brest, Dinard, Lorient, Rennes et Rostrenen entre 1951 et 2021, b) Ecart de température moyennes saisonnières (°C) entre 1991-2020 et 1961-1990

Source : Bonnardot *et al.*, 2022

Concernant la pluviométrie, il est plus difficile d’observer des tendances « à la hausse » ou « à la baisse » puisque l’évolution de cette variable est assez incertaine (Amiot *et al.*, 2022). De manière générale, en Bretagne, la partie ouest et centre est plus arrosée que l’est de la région, en raison du relief.

2.2. Contexte climatique local

Le Golfe du Morbihan en Bretagne, qui présente de multiples configurations du climat océanique, a été choisi comme cadre d'expérimentation dans cette thèse. La configuration géographique de ce site (présence de nombreuses îles et îlots, proximité immédiate du littoral, presque îles et sites plus en intérieur des terres) permet de mieux appréhender et comprendre les variabilités du climat aux échelles fines notamment en lien avec l'influence maritime. Ainsi, à l'échelle du Golfe du Morbihan et du département morbihannais, plusieurs stations météorologiques et capteurs thermiques ont été installés dans le cadre de l'IRP VINADAPT, afin de mieux appréhender la variabilité du climat à des échelles plus locales. A l'échelle de la Bretagne plusieurs sites d'observation ont été équipés de réseaux de mesures pour caractériser les conditions climatiques dans des vignobles émergents (Figure 51). Plusieurs parcelles de vignes à l'île d'Arz, Sarzeau, Theix-Noyal et Muzillac ont ainsi été instrumentées. Les capteurs ont été installés entre fin 2020 et début 2021, à l'exception de Theix-Noyal qui a été instrumenté au printemps 2022.

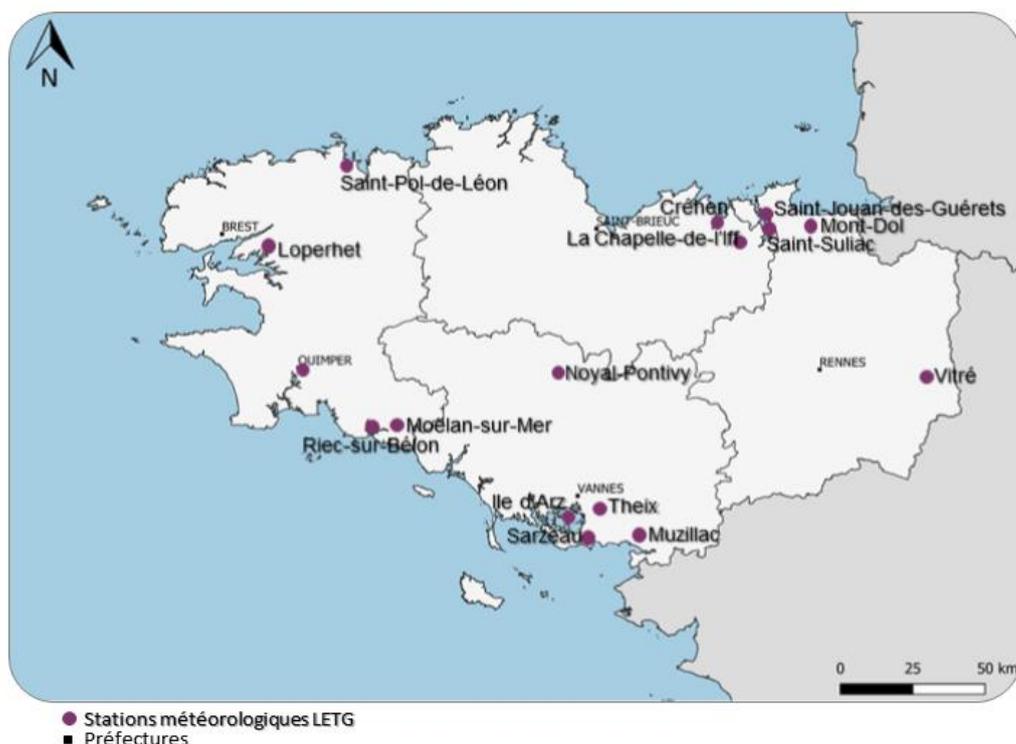


Figure 49 - Réseaux de stations météorologiques installées en Bretagne

Adaptée de Bonnardot *et al.*, 2022

Des capteurs thermiques, de type Tinytag (Figure 50), ont été installés sur des piquets en bois dans la parcelle, à hauteur de végétation, afin d'enregistrer les températures minimales et maximales, toutes les heures. A cette fréquence temporelle, l'autonomie de stockage est d'environ un an. En complément, des stations météorologiques, type Davis Vantage pro (Figure 50), fournissent des données horaires de températures, d'humidité, de précipitations et de vents d'un site. Chaque station est connectée à une console, alimentée en électricité et connectée à internet, afin de transmettre les données en temps réel sur un serveur administré par MeteoData (<https://www.meteodata.fr/>). En l'absence de branchement électrique, la console peut être alimentée par des piles et les données stockées sur une carte mémoire. Dans ce dernier cas, l'autonomie devient l'inconvénient principal et impose un relevé des données et un remplacement des piles toutes les 10 semaines pour éviter toute perte d'information. Cette configuration reste la plus courante sur les terrains littoraux et insulaires investigués durant cette thèse (habitations trop éloignées, implantation nouvelle donc pas de présence de chais, etc.). A l'île d'Arz, du fait des conditions d'accès à la station plus chronophages (temps de traversées et d'accès au site, contexte sanitaire et confinement ayant réduit les horaires des navettes, etc.), la station a été équipée afin d'être totalement autonome depuis le printemps 2022. Ainsi, les données sont transmises en temps réel par données mobiles, et stockées sur le serveur MeteoData.



Figure 50 - a) Capteur thermique Tinytag au vignoble du Poulhors, Sarzeau, b) Station météorologique David Vantage Pro dans le Coteau de Liouse, île d'Arz

Crédit photos : Jeanne Thibault

Pour compléter ce réseau de mesures, les données des stations de Groix, Belle-Île-en-mer, Saint-Avé et Plumergat fournies par MétéoData ont été intégrées à l'étude (Tableau 17). Au début de la saison végétative (avril), les épisodes de gel peuvent impacter les bourgeons. L'année 2021 a notamment été très marquée par des épisodes de gel advectif au mois d'avril, suite à un mois de mars relativement doux qui a permis un débourrement précoce de la vigne (Bonnardot *et al.*, 2022). Les stations les plus éloignées de l'océan sont celles qui enregistrent les extrêmes de températures les plus importants (Tableau 17). En 2022, au mois d'avril, la température la plus basse enregistrée à l'île d'Arz était de 1.6°C, contre -2.6°C à Muzillac, soit une différence de 4.2°C. De même, les températures les plus hautes en juillet et août étaient de 37.8°C et 34.6°C pour l'île d'Arz, contre 41.7°C et 37°C pour Muzillac, soit une différence de 3.9°C en juillet, et de 2.4°C en août. Si les températures moyennes sont plus élevées en avril sur les îles et la frange littorale, elles sont un peu plus basses durant la saison estivale en comparaison aux sites plus éloignés de la côte.

Stations	Dist. à l'océan (km)	Temp. min.		Température s maximales		Températures moyennes				Huglin		Winkler	
		Avril	Juillet	Août	Août	Avril	Juillet	Août	Saison	Valeur	Classe	Valeur	Classe
Belle-ile-en-mer	0.5	2.5	33.6	34.6	12.08	20.55	21.28	17.41	1842	Tempéré	1398	II	
Grois	0.1	3.2	38	34.4	12.37	20.61	21.15	17.45	1822	Tempéré	1450	II	
Arz **	0.3	1.6	37.8	34.6	12.17	21.18	21.82	17.77	1926	Tempéré	1195	I	
Sarzeau **	1.5	-1.2	39.8	35.9	11.66	21.15	21.38	17.52	2055	Tempéré	1423	II	
Theix-Noyal **	3.0	-3.2	40.6	36.6	12.33	21.40	21.71	17.79	-	-	1470	II	
Muzillac **	3.0	-2.6	41.7	37	11.79	21.30	22.18	17.66	2150	Tempéré chaud	1472	II	
Saint-Avé (ville)	9.5	-	-	-	11.74	21.57	21.81	17.74	-	-	1443	II	
Plumergat	11.0	-	-	-	11.13	20.88	21.35	17.21	-	-	1351	I	

Tableau 17 - Températures durant la saison végétative 2022

Données : MétéoFrance et instrumentation IRP VINADAPT (**)

Les valeurs des indices bioclimatiques classifient le département morbihannais comme « tempéré » pour la viticulture. A l'instar des extrêmes de températures, plus le site est éloigné de l'océan, plus les valeurs de l'indice héliothermique de Huglin sont élevées. Si actuellement les sites insulaires sont proches de la limite basse de la classe tempérée (entre 1800 et 2100 pour la classe “tempéré”), dans un contexte de hausse des températures, les valeurs de l'indice de Huglin pourraient augmenter de manière significative. Cependant, les sites les plus proches de l'océan bénéficieront toujours de valeurs plus basses en comparaison aux sites plus continentaux. Ils comptabiliseront également moins d'extrêmes climatiques.

Cette caractéristique est, en partie, la conséquence des brises littorales qui permettent d'atténuer les températures lors des heures les plus chaudes de la journée (Bonnardot *et al.*, 2005), de diminuer la durée et l'intensité du stress thermique sur l'activité photosynthétique des vignes (Bonnardot *et al.*, 2001, 2005 ; Fourment *et al.*, 2014a, 2014b ; Planchon *et al.*, 2004) ou encore de diminuer le risque de maladies fongiques (Xyrafis *et al.*, 2021). Pour ce dernier point, les années 2022 et 2023 ont permis de conforter cette hypothèse sur au moins deux vignobles : Sarzeau et Theix. En effet, lors des différents relevés de capteurs, Guillaume Hagnier (vignoble du Poulhors, Sarzeau) ainsi que Loïc Fourure ont confirmé qu'en mode de production biologique, l'exposition aux pathogènes est relativement faible sur les sites. Afin de confirmer l'effet de brise de mer sur les températures (Bonnardot *et al.*, 2002), les données de vent, de températures et d'humidité relative à pas de temps horaires ont été analysées pour la journée du 18 juin 2022 sur les stations de l'île d'Arz, de Sarzeau, Theix et Muzillac (Figure 51). Les stations de Belle-île-en-mer, Groix, Saint-Avé et Plumergat ne disposant pas des températures maximales à pas de temps horaires, n'ont pas pu être intégrées dans cette analyse.

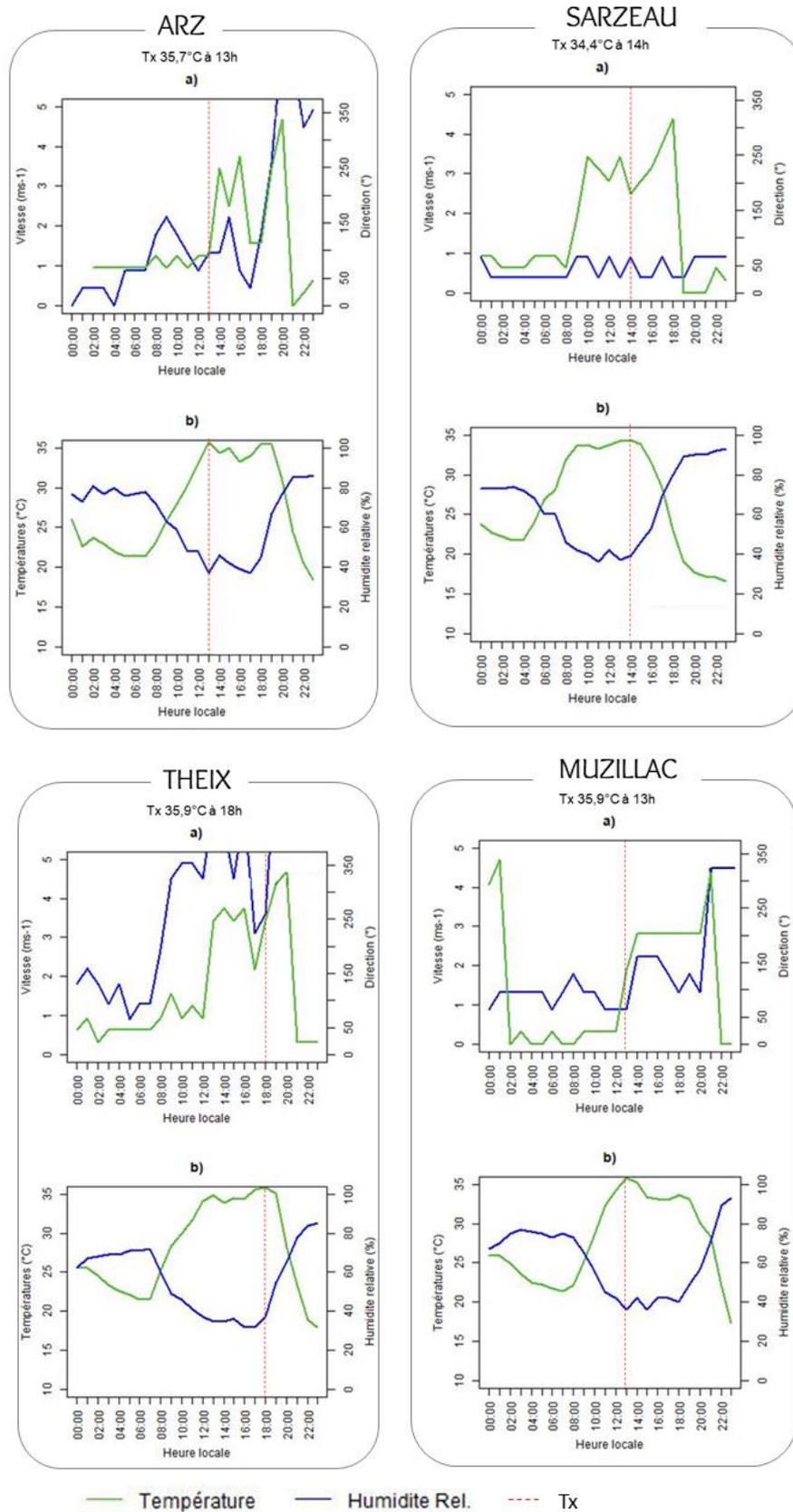


Figure 51 - Paramètres climatiques du 18 juin 2022 pour les stations météorologiques de l'île d'Arz, Sarzeau, Theix et Muzillac : a) Vitesse (m.s-1) et direction (°) du vent ; b) Températures (°C) et humidité relative (%)

Ainsi, pour la journée du 18 juin 2022, la station météorologique de l'île d'Arz a enregistré un changement de la direction du vent à partir de 12h, passant d'une orientation est-nord-est, à est, additionnée d'une composante ouest, sud-ouest à partir de 14h. Le changement de direction de 14h est précédé du maximum de température enregistré sur cette journée pour l'île d'Arz. A partir de 17h, la vitesse du vent augmente considérablement, passant de 2 km/h à 24km/h à 20h. Cette augmentation rapide de la vitesse du vent est concomitante à une augmentation de l'humidité relative (de 37% à 77% entre 17h et 20h).

A Sarzeau, un changement de direction du vent s'opère à partir de 9h, passant d'une orientation est-nord-est, à ouest-sud-ouest jusqu'à 16h, et ouest à 17h. Ces changements sont accompagnés de variations des températures maximales : les températures augmentent progressivement jusqu'à 9h, puis se stabilisent jusqu'à 15h. A partir de 15h, les températures diminuent progressivement jusqu'à 19h où un changement de direction et une augmentation des vents sont enregistrés.

A Theix, la vitesse du vent augmente à partir de 9h, passant d'une orientation nord-est d'un peu plus de 3.5 km/h, à une orientation est, nord-est jusqu'à 12h, puis ouest, sud-ouest jusqu'à 18h. A partir de 19h, la vitesse du vent augmente considérablement passant de 5 km/h à 18h, à 22 km/h à 21h. Cette augmentation s'accompagne d'un changement de direction nord, nord-est. De la même manière que pour Sarzeau, ces changements de vents sont accompagnés de variations des températures : elles augmentent progressivement jusqu'à 12h, se stabilisent autour de 34°C. A partir de 18h, les températures diminuent et l'humidité relative augmente.

De la même manière, Muzillac enregistre une augmentation notable de la vitesse du vent à partir de 12h, accompagné d'un changement de direction des vents, passant d'une orientation nord, nord-est à une orientation sud, sud-ouest. C'est également à partir de 12h que les températures se stabilisent autour de 34°C, et à partir de 19h qu'une diminution des températures est observée. La diminution des températures est plus rapide à partir de 21h, où un changement de direction et une augmentation de la vitesse du vent sont enregistrés.

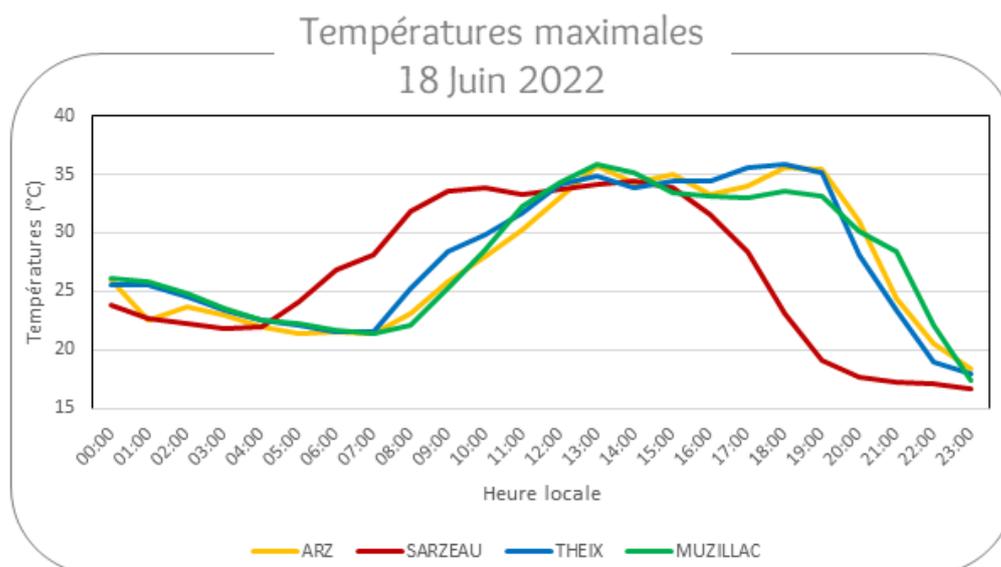


Figure 52 - Températures maximales (°C) à pas de temps horaires le 18 juin 2022, pour les stations d'Arz, Sarzeau, Theix et Muzillac

Ces différentes configurations montrent que les vents ont permis de stabiliser les températures sur l'ensemble des sites entre le début d'après-midi (12/13h) et la fin d'après-midi (Figure 52). Les températures les plus élevées ont été enregistrées à 13h à l'île d'Arz (35.7°C), à 14h à Sarzeau (34.4°C), à 18h à Theix (35.9°C) et à 13h à Muzillac (35.9°C). Quel que soit le lieu où l'horaire, ces températures les plus élevées ont toutes été conjointes à un changement de direction des vents. Ces conditions climatiques particulières dues à la proximité de l'océan représentent un réel avantage pour la culture de la vigne.

3. Modélisation des potentialités viticoles futures à l'échelle de la région Bretagne

Cette expérimentation est en partie issue d'un article en cours de publication, intitulé « Modelling potential wine growing area in a context of climate change : Application to an emerging region, Brittany, France », co-rédigé par Jeanne Thibault, Baptiste Hamon, Cyril Tissot et Hervé Quénot.

Bien que le territoire breton possède une histoire viticole importante et que le contexte climatique actuel semble en adéquation avec les besoins thermiques de la vigne, il apparaît pertinent d'identifier des zones viticoles et les cépages les plus optimaux à l'échelle de la Bretagne dans les années à venir.

3.1. Scénarisation

Afin de comprendre l'évolution potentielle de la viticulture dans cette région émergente, différents cépages seront testés par MAUVE. Cette scénarisation permet d'identifier de potentiels espaces suboptimaux pour la culture de la vigne. A l'instar de la Nouvelle-Zélande, l'implantation d'une variété est verrouillée durant 30 ans par le modèle MAUVE. Ainsi, lorsqu'une maille est jugée suboptimale par MAUVE, elle est considérée comme exploitée pour une période de 30 ans.

3.1.1 Modèle climatique et des scénarios associés

Afin d'expérimenter le modèle MAUVE en Bretagne en tant que région viticole émergente, les données climatiques issues des projections climatiques régionalisées ont été utilisées. Les données de projection de changement climatique ont été téléchargées depuis le site de la DRIAS. Le projet DRIAS (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement) est une convention mise en place entre Météo-France, l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) et le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) afin de faciliter l'accès aux scénarios régionalisés de changement climatique en France. Le service DRIAS fournit notamment des simulations régionalisées pour différents scénarios du changement climatique. Actuellement, le portail ne fournit pas des simulations avec SSP (Shared Socio-Economic Pathways), mais uniquement des projections basées sur différents RCP (Representative Concentration Pathway). A l'échelle

de la France, Braconnot *et al.* ont comparé les résultats obtenus grâce aux RCP aux différentes simulations du GIEC, et les résultats sont similaires (Braconnot *et al.*, 2019). Les simulations issues du RCP permettent ainsi de traduire des tendances futures analysées par le GIEC.

Pour les différentes études réalisées à l'échelle de la Bretagne, les données téléchargées couvrent la période 2006-2100, à pas de temps journalier et à une résolution de 8km². Les données quotidiennes sont issues du modèle CNRM-CERFACS-CNRM-CM5/CNRM-ALADIN63 (GCM/RCM) ont été extraites pour toutes les mailles de la Bretagne, entre 2006 à 2100. Deux RCP différents sont comparés : le RCP 4.5 et le RCP 8.5. Chaque résultat est résumé par période, correspondant aux horizons temporels définis par le GIEC 2021 : le court terme correspond à 2021-2040, le moyen terme à 2041-2060 et le long terme à 2081-2100.

3.1.2. Choix de cépages

La région étant émergente pour la culture de la vigne, la Bretagne ne possède pas de cépage emblématique comme en Nouvelle-Zélande par exemple. L'absence d'appellation et de cahier des charges ne contraignent pas l'implantation de cépages spécifiques et plusieurs cépages sont testés par les viticultures : internationaux comme le Chardonnay, le Chenin ou le Cabernet franc, nationaux comme le Grolleau, le Savagnin ou le Pinot d'Aunis, historiques comme le Berligou ou le Gros-plant ou encore hybrides avec du Solaris. En l'absence de cépages emblématiques de la région, il semble plus pertinent de tester différents cépages plutôt que quelques cépages spécifiques.

Pour cette raison, plusieurs groupes de variétés ont été pensés en fonction de leurs « niveau de maturité ». Les cépages ont alors été regroupés en fonction de leur valeur de l'indice GSR (Parker *et al.*, 2020b, 2020a), puis classés en fonction des styles de vins produits. Ainsi, le premier groupe de variétés comprend le Pinot noir, le Merlot et le Gamay, le second le Cabernet Franc, le Syrah et le Grenache, et le dernier avec du Cabernet Sauvignon, le Petit Verdot et le Cinsault.

Actuellement, seuls les cépages couramment cultivés ont été sélectionnés pour l'expérimentation. Ce choix restrictif est lié au fait qu'il existe peu de données relatives aux cépages historiques comme le Berligou ou le Gros-plant, ce qui rend difficile le calcul d'indices phénologiques. Ce constat s'applique également aux cépages hybrides récemment plantés. Ces cépages ne sont donc pas intégrés dans la base de données actuelle, bien qu'ils puissent s'avérer

intéressants dans le cadre d'une prospection viticole. Le niveau de maturité technique est fixé à 200 mg/L pour l'ensemble des cépages (Bonnardot et Quénot, 2020).

3.1.3. Définition des contraintes

La surface minimale d'implantation pour cette expérimentation est fixée à 5 hectares de terres agricoles. Elle correspond à la superficie actuelle de certains vignobles commerciaux situés dans le Golfe du Morbihan. Les zones d'aptitude ont été déterminées à l'aide de la base de données d'occupation de sol Corine Land Cover 2018 (CLC) en sélectionnant la classe « surface agricole » de la nomenclature. L'utilisation du référentiel CLC s'avère bien adaptée à une expérimentation à échelle régionale.

La seconde contrainte est relative à la des sols. A l'instar de l'application en Nouvelle-Zélande, c'est la composante drainage qui a été retenue. En s'appuyant sur la classification des sols produite par l'INRAE en 2012 (Annexe 5).

La troisième contrainte est liée à l'antériorité viticole afin de favoriser la sélection de surfaces déjà consacrée à la viticulture.

Enfin la quatrième contrainte vise à limiter un éventuel effet de fragmentation en privilégiant le voisinage des cellules déjà plantées. Compte tenu de la résolution du modèle climatique (8 km²), un voisinage d'ordre 1 a été privilégié. A des échelles plus fines, le niveau des relations de voisinage peut être adapté, avec un ordre de 2 ou 3 voisins.

3.1.4. Définition des objectifs

Les objectifs sont identiques à ceux implémentés pour l'application menée à l'échelle de l'île du sud de la Nouvelle-Zélande. Ils concernent donc la recherche d'une maturité optimale pour l'un des trois groupes de cépages identifiés, la minimisation de l'exposition aux risques climatiques et de la pression sanitaire.

3.2. Analyse de l'évolution des potentialités viticoles bretonnes futures

3.2.1. Bilan héliothermique

Afin de comprendre l'évolution climatique de la région Bretagne dans les années à venir, le modèle MAUVE calcule l'indice de Huglin pour l'ensemble des années comprises entre 2006 et 2100 (Figure 53). Les résultats obtenus montrent une nette évolution du sud-ouest de la région vers le nord-est, observée sur les deux RCP (4.5 et 8.5). Dans les deux cas, à horizon 2070, la partie ouest des Côtes-d'Armor, et la quasi-totalité du Morbihan et de l'Ille-et-Vilaine ont des valeurs d'indices les classifiant comme « tempérés ». La région au sud-ouest breton allant de Rennes à Vannes est considérée comme « tempérée chaude » dans les deux scénarios mais l'étendue spatiale de cette classe climatique est plus importante avec le RCP8.5.

A horizon 2100, la région « tempérée chaude » s'étend vers le centre des départements du Morbihan et de l'Ille-et-Vilaine pour le RCP4.5, et couvre presque l'intégralité de ces départements et la partie ouest des Côtes d'Armor pour le RCP8.5. Au même horizon temporel et pour le RCP8.5 uniquement, la partie sud-ouest de la région Bretagne est classifiée comme « chaude » pour la culture de la vigne, selon les valeurs de l'indice de Huglin. La moitié nord-est de la Bretagne est considérée comme « tempérée chaude » avec le RCP8.5, et « tempérée » avec le RCP4.5. Dans tous les cas, l'augmentation des valeurs d'Huglin est observée graduellement du sud-ouest vers le nord-est de la région.

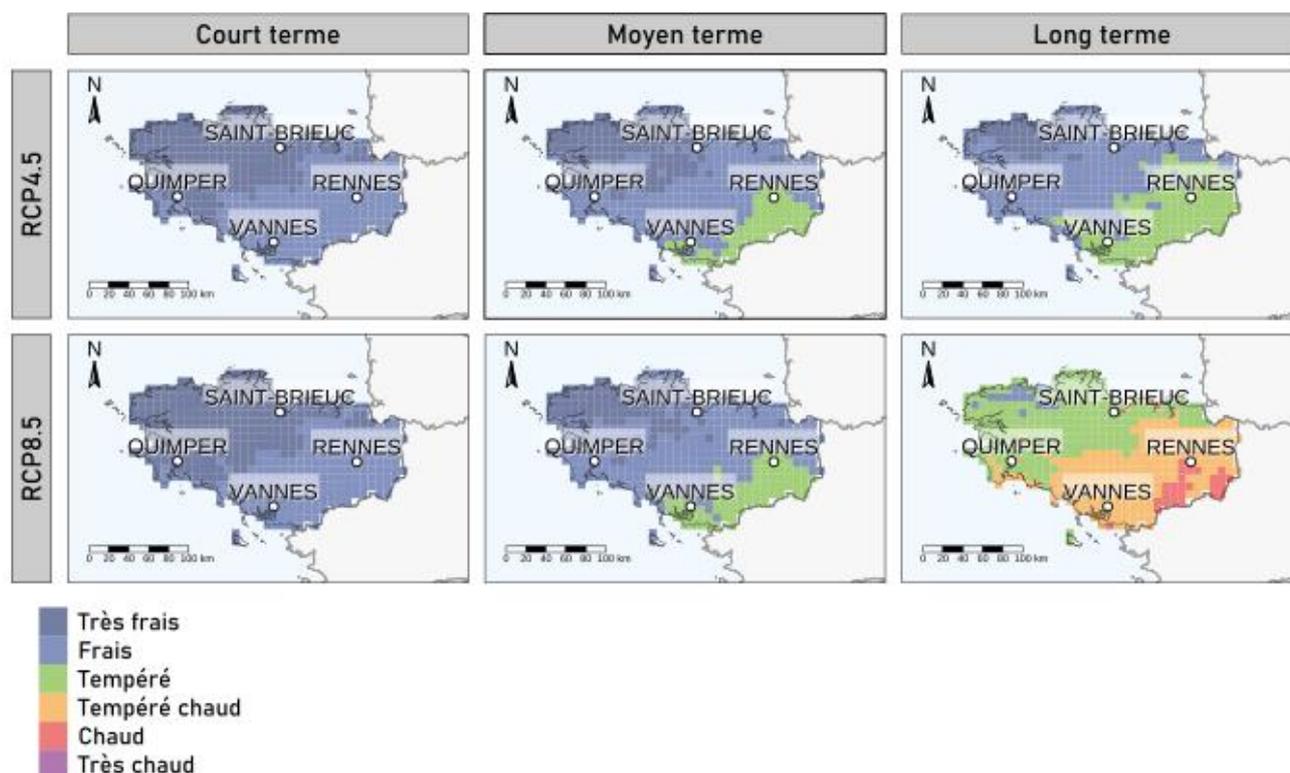


Figure 53 - Indice de Huglin calculé à court terme (2021-2040), à moyen terme (2041-2060) et à long terme (2081-2100) en région Bretagne, pour les RCP4.5 et RCP8.5

Données : CNRM

3.2.2. Le risque d'évènements climatiques extrêmes

Le risque de fortes chaleurs a été calculé pour différents cépages entre la date de débourrement et la maturité technique. A ce stade, il convient de différencier le risque de fortes chaleurs et le risque d'échaudage. En effet, le risque de forte chaleur est important entre le débourrement, et jusqu'au stade de floraison (inclus), alors que le risque d'échaudage ne concerne que les baies. Concernant le risque de fortes chaleurs, à partir de 30°C, l'activité chlorophyllienne de la vigne diminue graduellement et s'annule à 35°C et au-delà (Huglin, 1986 ; Keller, 2010 ; Schultz, 2000). Si le risque d'échaudage est considéré comme potentiel sur le même seuil de températures (à partir de 35°C), il ne peut se produire qu'à partir de la formation des baies. L'échaudage désigne la brûlure des raisins et se caractérise par une « nécrose » de la baie, pouvant aller jusqu'au dessèchement dans les cas les graves. La Figure 54 présente les résultats pour le Cabernet Sauvignon, le Petit Verdot ou le Cinsault sur l'ensemble de la Bretagne, pour les RCP4.5 et RCP 8.5. Dans les deux scénarios, et pour l'ensemble des horizons temporel, la côte sud comptabilise le plus d'occurrences de jours supérieurs à 35°C, en comparaison à la côte nord. A long terme, la côte sud bretonne du RCP8.5 comptabilise au moins 5 jours

supérieurs à 35°C par an, tandis que le centre Bretagne et le Finistère connaissent moins de 3 occurrences annuelles sur la quasi-totalité des horizons temporels et des scénarios.

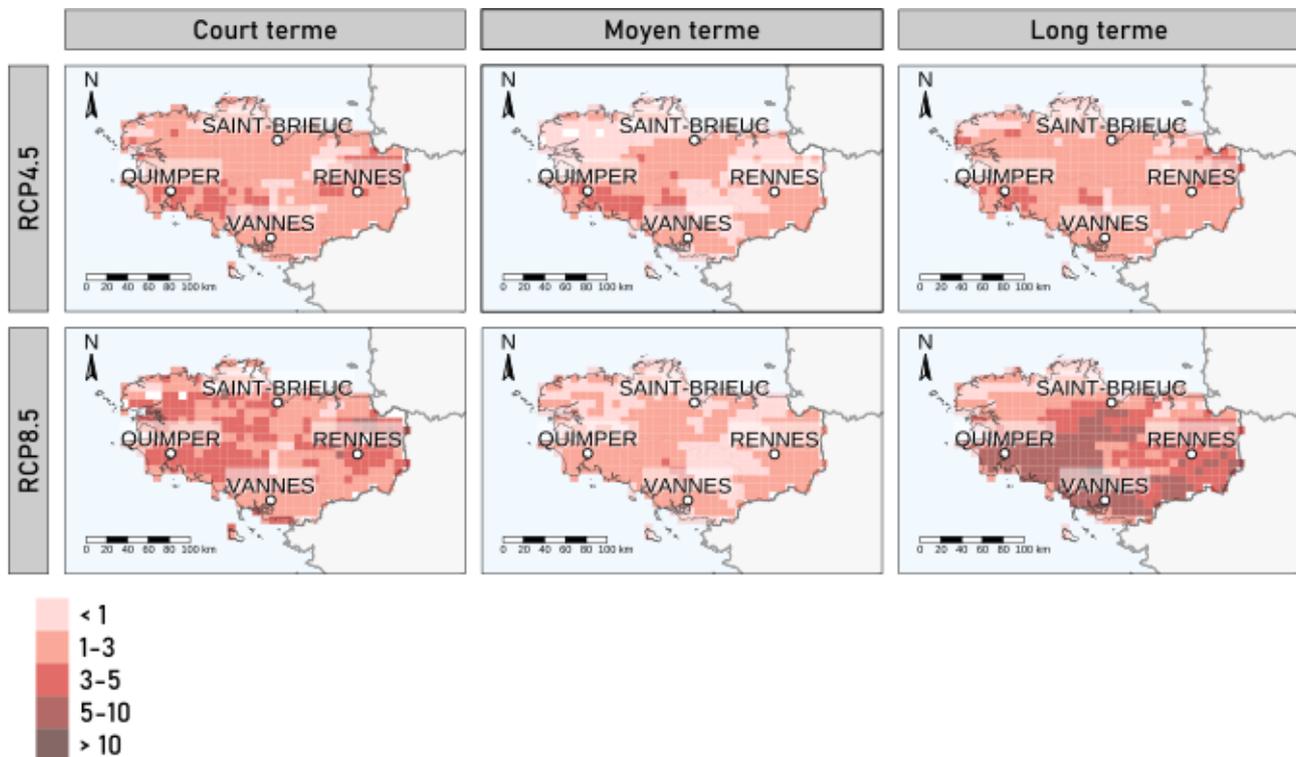


Figure 54 - Nombre moyen de jours de forte chaleur (>35°C) entre le débourrement et la maturité techniques du Cabernet Sauvignon, Petit Verdot ou Cinsault à court terme (2020-2041), moyen terme (2041-2060) et long terme (2061-2100) pour le RCP4.5 et RCP8.5

Données : CNRM

Cependant, même si les tendances sont à une augmentation des températures, le risque de gel reste présent. En effet, les températures plus douces favorisent un débourrement plus précoce de la vigne (Ramos et Jones, 2018) et le risque de gel sur les bourgeons est donc plus accru (Sgubin *et al.*, 2018 ; Webb *et al.*, 2017). Dans une étude réalisée par Petitjean *et al.* sur le risque de gel en Bretagne et Pays de la Loire, le risque de gel après débourrement est faible en Bretagne sur la période 2020-2050 pour le RCP4.5 (Petitjean *et al.*, 2022). Il s'accroît légèrement sur la seconde période 2050-2100 notamment à l'ouest de l'Ille-et-Vilaine, et à la jonction des Côtes d'Armor, de l'Ille-et-Vilaine et du Morbihan. Avec un scénario 8.5, le risque de gel après débourrement est plus accru sur la période 2020-2050, et présent sur l'ensemble du territoire pour la période 2050-2100 (Figure 55).

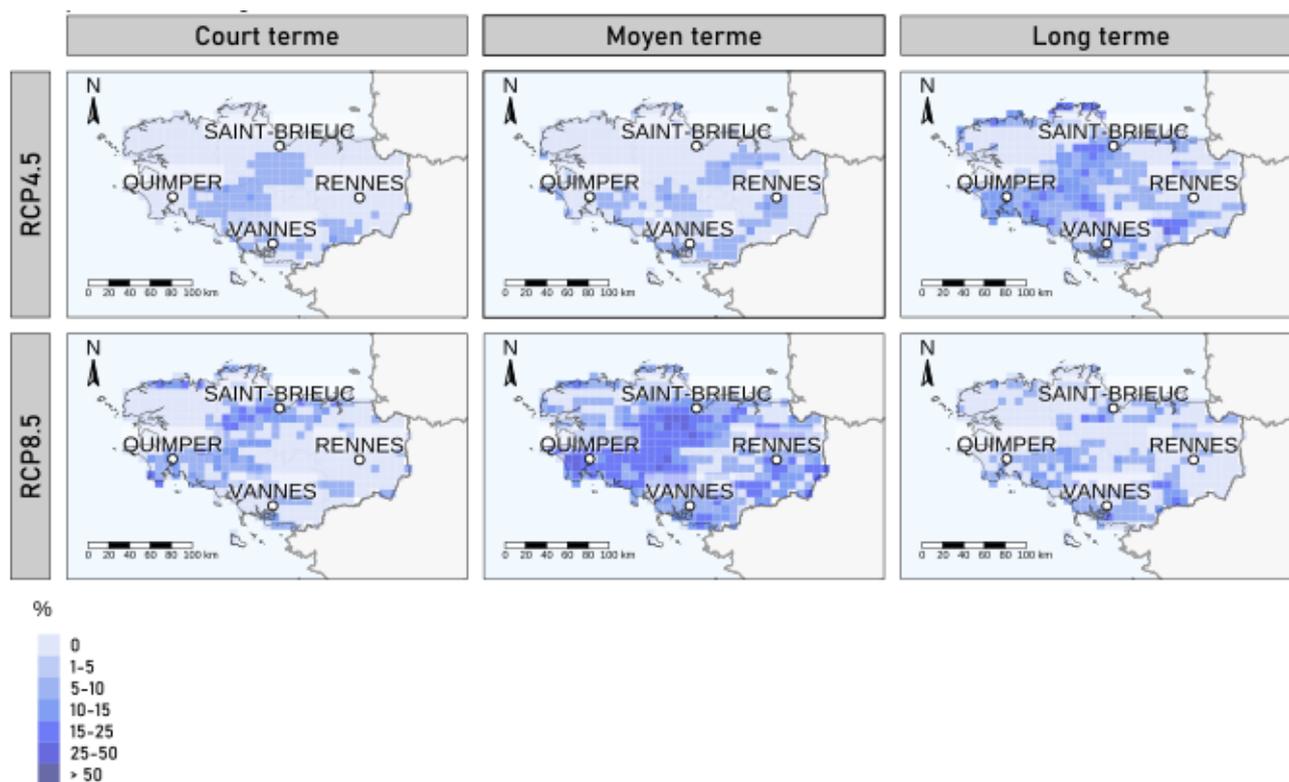


Figure 55 - Fréquence de gel (% d'années avec un épisode de gel après débourrement à en Bretagne à court terme (2020-2041), moyen terme (2041-2060) et long terme (2061-2100) pour le RCP4.5 et RCP8.5

Données : CNRM

3.3. Résultats de l'optimisation

Lors de la phase d'optimisation, le modèle MAUVE recherche les meilleurs compromis entre les différentes contraintes et objectifs à atteindre. Les solutions obtenues représentent les meilleures combinaisons pour le scénario implémenté. Si une maille n'est pas classée comme étant une solution suboptimale, cela ne signifie pas que la maille n'est pas adaptée à la viticulture, mais simplement que la combinaison entre les objectifs et les contraintes n'est pas aussi bonne qu'une maille suboptimale. D'après le scénario choisi précédemment pour la région Bretagne, différentes situations émergent (Figure 56).

A court terme (2021-2040), les variétés telles que le Pinot noir, le Merlot ou le Gamay sont mises en évidence par le modèle pour les deux RCP retenus. Les implantations suboptimales de ces cépages sont principalement concentrées sur la côte sud-est de la Bretagne, avec un potentiel d'implantation plus important pour le RCP8.5 que le RCP4.5.

Durant toute la période et pour le RCP4.5, les zones suboptimales s'étendent le long de la côte sud de la Bretagne, de Vannes jusqu'au sud de Brest. A moyen (2041-2060) et à long terme (2081-2100), des variétés comme le Pinot noir, le Merlot ou le Gamay seraient appropriées le long des côtes nord-est de la Bretagne.

Pour le RCP8.5, une migration des espaces suboptimaux s'opère à moyen terme : la quasi-totalité du littoral breton semble adaptée à la culture de la vigne à partir de 2041. Des solutions suboptimales apparaissent sur le littoral nord de la Bretagne, ainsi que l'intérieur des terres des Côtes d'Armor. Des cépages comme le Pinot noir, le Merlot ou le Gamay semblent encore adaptés, mais des cépages tels que le Cabernet Sauvignon, le Petit Verdot ou le Cinsault apparaissent au nord-est de la région, à proximité de Saint-Brieuc. Cependant, ces résultats doivent être nuancés. En effet, si des variétés comme le Pinot noir, le Merlot ou le Gamay semblent mieux adaptées à l'ensemble des périodes, cela peut être dû à la durée entre la véraison et la maturité plus courte que pour d'autres variétés. Par voie de conséquence, les expositions aux risques pathogènes et aux risques d'échaudage sont donc, potentiellement, moins nombreuses pour ces cépages, et les combinaisons entre objectifs et contraintes sont meilleures pour les cépages à maturité plus précoce.

De même, certaines expositions aux risques climatiques peuvent être surévaluées par MAUVE. Par exemple, en se basant uniquement sur des occurrences climatiques, les caractéristiques propres aux cépages sont également minimisées. En effet, MAUVE considère tous les cépages

de la même façon et ne prend pas en compte la manière dont réagissent les cépages (cépages plus résistants aux épisodes de gel, etc.). Il est également difficile d'intégrer certaines variables climatiques telles que le vent. Si l'effet asséchant du vent joue un rôle sur l'exposition aux agents pathogènes (moins d'expositions sur le littoral), il semble assez complexe de traduire cet effet dans la modélisation.

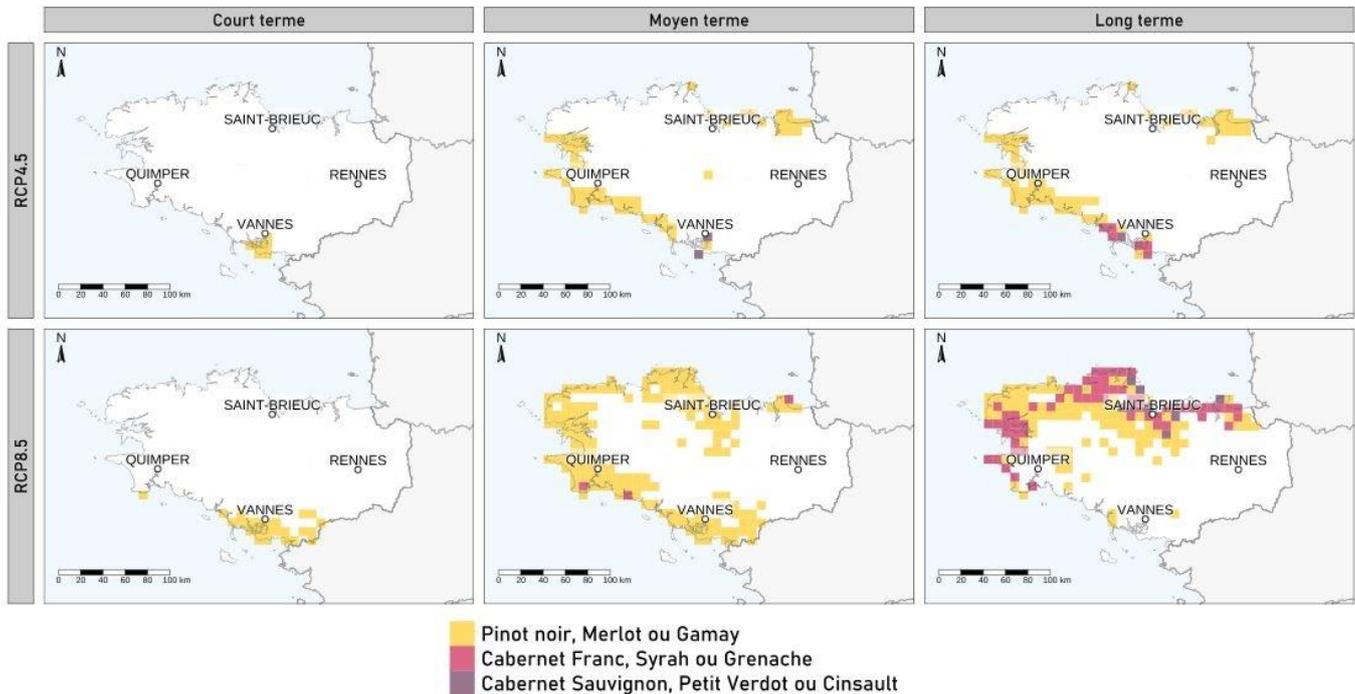


Figure 56 - Résultats suboptimaux de MAUVE relatifs à l'implantation des cépages viticoles à court (2020-2040), moyen (2041-2060) et long (2081-2100) terme pour les RCP4.5 et RCP8.5. Région Bretagne, France

Données : CNRM

4. Expérimentation à plus haute résolution

4.1. Scénarisation

Afin de tester le modèle MAUVE à des échelles plus fines, une descente d'échelle statistique a été effectuée sur les données climatiques. A l'aide des données journalières d'une vingtaine de stations MétéoFrance entre 2005 et 2010, les données journalières issues du modèle CNRM et produites à 8km de résolution ont été résolues à 1km à l'échelle du Golfe du Morbihan pour le scénario RCP 8.5 en utilisant des variables topographiques à l'aide d'un algorithme Support Vector Machine (SVM) (Morin *et al.*, 2021) (Figure 57).

Avec une telle résolution, les données climatiques représentent désormais plus de 200 mailles indépendantes à l'échelle du Golfe (contre 7 mailles sans descente d'échelles). L'ensemble de ces données couvre la période 2020 à 2100 à pas de temps journalier pour les variables de températures (températures minimales, maximales et moyennes). Les variables telles que le vent, les précipitations et l'humidité n'ont pas été rééchantillonnées. Les valeurs extraites des mailles à 8km ont donc été attribuées aux mailles à 1km correspondantes.

Dans l'optique de comparer les résultats des deux simulations bretonnes, les mêmes contraintes et objectifs que la simulation à l'échelle régionale ont été repris.

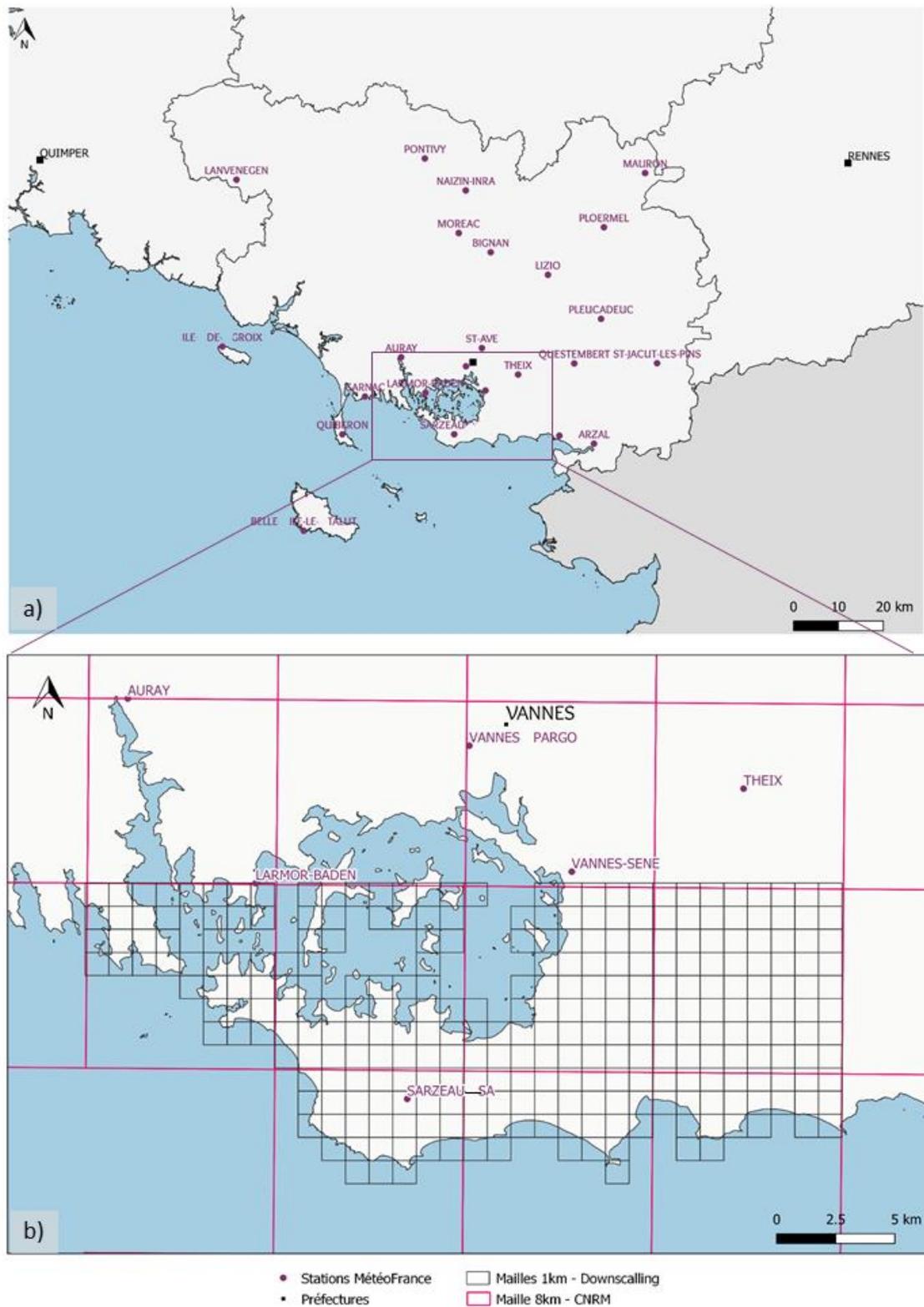


Figure 57 – a) Localisation des stations météorologiques MétéoFrance utilisées pour la descente d'échelles, b) Représentations des mailles climatiques issues des données projetées et de la descente d'échelle

4.2. Résultats de l'optimisation

En concordance avec le scénario établi en amont, le modèle MAUVE évalue les meilleurs compromis possibles entre les différents objectifs et contraintes. Ainsi, les solutions proposées représentent les meilleures combinaisons possibles, au vu du scénario établi.

L'évolution des solutions d'implantations suboptimales de la vigne est notable à partir du moyen terme. Pour cette raison, les résultats ne présentent pas les solutions à court terme (2020-2040) (Figure 58). A l'échelle du Morbihan, selon le scénario établi, à moyen terme (2041-2060), les variétés telles que le Cabernet Franc, le Syrah ou le Grenache semblent plus adaptées. A long terme (2080-2100), le Pinot noir, Merlot ou Gamay semblent plus adaptés à l'ouest du Golfe, autour de Surzur, Ambon, Le Tour-du-Parc, tandis que la moitié ouest (presqu'île de Rhuys) semblent plus adaptés aux Cabernet Franc, Syrah ou Grenache. La nette délimitation entre les cépages Pinot noir, Merlot ou Gamay et le Cabernet Franc, Syrah ou Grenache à long terme peut notamment s'expliquer par la délimitation des mailles projetées à 8km.

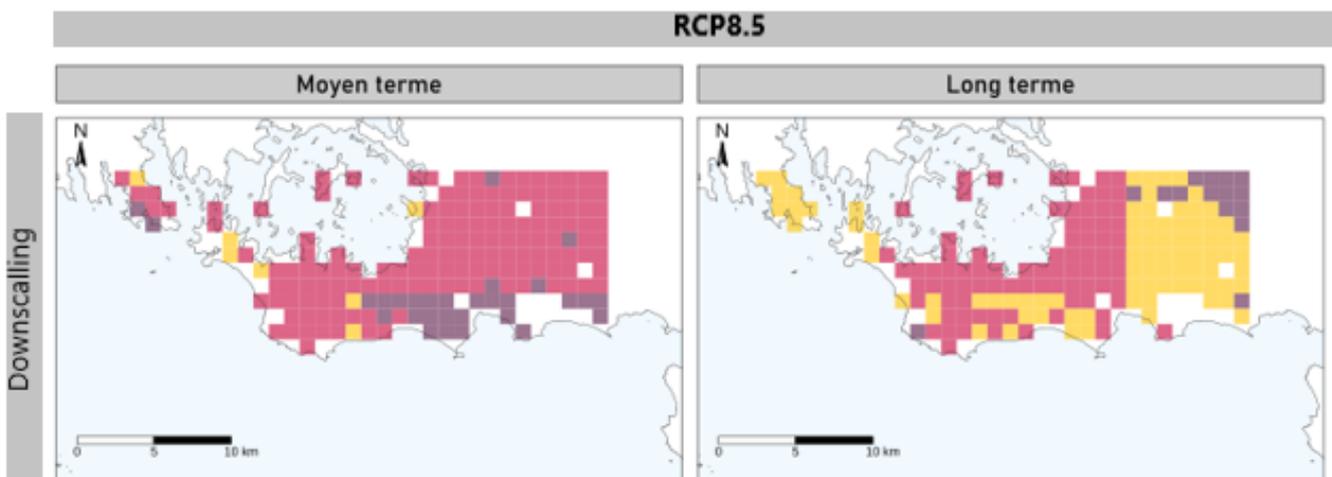


Figure 58 – Résultats suboptimaux de MAUVE relatifs à l'implantation des cépages viticoles à moyen (2041-2060) et long (2081-2100) terme pour les RCP4.5 et RCP8.5. Golfe du Morbihan, Bretagne
Données : CNRM

Quel que soit l'horizon temporel, l'ouest (l'île aux Moines, Arzon, Locmariaquer) et le sud (Saint-Gildas-de-Rhuys, Saint-Jacques, Penvins) de la presqu'île de Rhuys, ainsi que l'ouest du Golfe (Damgan) sont exempts de solutions. Ce résultat est lié à la pression foncière qui s'exerce dans ces zones et qui laisse peu de place pour des implantations viticoles

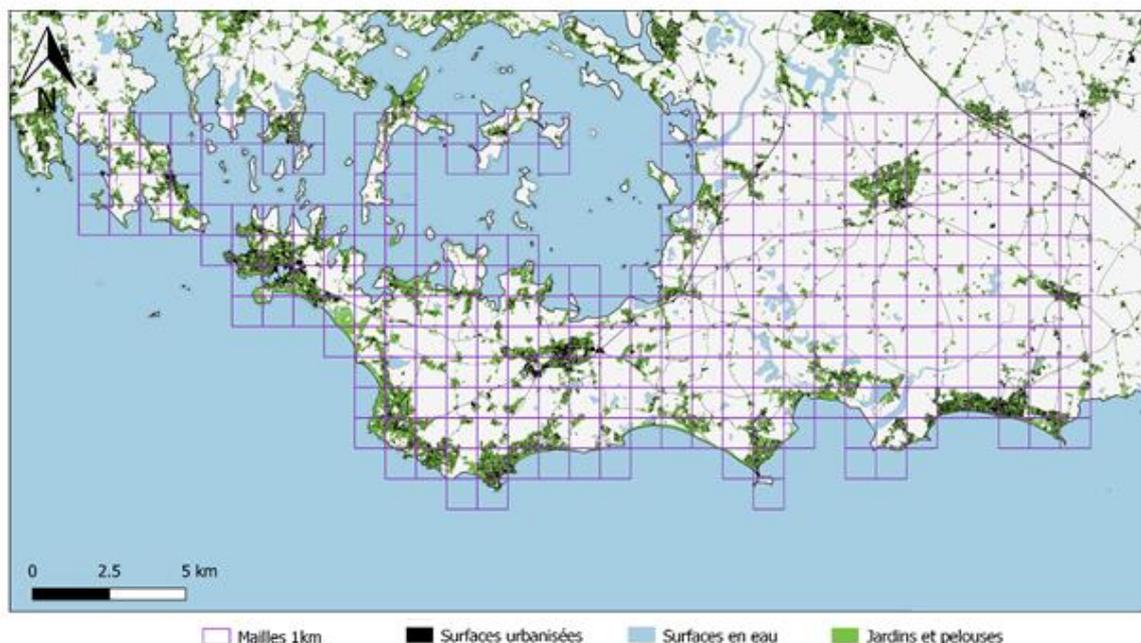


Figure 59 – Occupation du sol de la presqu'île de Rhuys

Données : Data.gouv

De la même manière que pour l'expérimentation à échelle régionale, les résultats présentés sont à nuancer. A niveau de maturité technique équivalente, les variétés telles que le Cabernet Franc, le Syrah ou le Grenache nécessitent des degrés-jours de croissances moins importants que du Carbernet Sauvignon, Petit Verdot ou Cinsault. Par conséquent, le laps de temps entre les stades de débourrement et maturité technique est réduit sur le premier groupe de cépages, et les expositions potentielles aux risques sont potentiellement moins conséquentes pour ces variétés. Ces cépages seront donc privilégiés par le modèle puisque le compromis entre les objectifs et les contraintes sera plus facile à obtenir.

5. Conclusion de chapitre

Bien que la présence de vignobles en Bretagne soit attestée depuis le Moyen Âge, les différentes décisions politiques et les crises sanitaires (oïdium, mildiou, phylloxera) ont contribué à la disparition des vignobles bretons vers 1955. Avec un réchauffement observé depuis plusieurs années (Duchêne et Schneider, 2005 ; Jones et Davis, 2000 ; Schultz, 2000 ; Seguin et Garcia de Cortazar, 2005), la Bretagne apparaît désormais comme un territoire émergent pour la culture de la vigne (Bonnardot et Quéno, 2020 ; Hannah *et al.*, 2013 ; Malheiro *et al.*, 2010 ; Petitjean *et al.*, 2022 ; Thibault *et al.*, 2022). Si le contexte climatique régional semble approprié à la viticulture, le contexte climatique local des îles et du littoral breton offre des atouts non-négligeables (moins d'extrêmes de températures, brise maritime, pluviométrie, etc.) qui se traduisent par de nombreux démarrages d'exploitations dans ces zones.

Ce nouveau viticole n'étant pas soumis à un cahier des charges comme certaines régions viticoles, de nombreux cépages sont implantés : internationaux, nationaux, historiques et hybrides.

L'étude du contexte climatique breton illustre parfaitement les spécificités climatiques de la frange littorale en démontrant l'effet modérateur de l'océan en particulier sur les températures extrêmes. En comparant les relevés de températures de plusieurs stations météorologiques durant la saison végétative 2022 dans le Golfe du Morbihan, des différences de 8°C ont été observées en juillet pour les températures maximales, les minimales ayant été enregistrées au plus proche du littoral. De même pour les températures minimales, jusqu'à 6°C de différence ont été observés en avril entre des stations littorales et les stations situées plus à l'intérieur des terres ; les températures minimales les plus douces ont également été observées pour les stations littorales.

Ces spécificités sont également mises en avant dans les résultats de l'optimisation. A l'échelle régionale, quel que soit le scénario envisagé (RCP4.5 ou RCP8.5), les côtes bretonnes sont considérées comme des solutions suboptimales : la côte sud morbihannaise dans un premier temps, mais également la côte finistérienne à moyen terme. Dans le cadre du RCP8.5 (scénario le plus pessimiste), l'ensemble des côtes finistériennes et costarmoricaïnes apparaissent comme des solutions suboptimales. Des résultats analogues s'observent à la fin du siècle avec une distribution spatiale très majoritaire dans les zones littorales (la côte nord de la Bretagne est particulièrement mise en avant dans les solutions obtenues).

A l'échelle du Golfe du Morbihan, les résultats sont plus nuancés puisque les espaces à proximité immédiate de l'océan sont soumis à une très forte pression foncière. Les résultats obtenus questionnent donc sur la place de la viticulture dans des espaces aussi contraints. Cette dernière expérimentation à l'échelle du Golfe démontre également que le modèle MAUVE en étant dirigé par les données est très influencé par la résolution des modèles climatiques utilisés et par l'appariement de l'ensemble des données. Ce constat renvoie à l'incertitude abordée dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 7

Analyse de l'incertitude dans la démarche d'optimisation

Suite aux applications menées en Nouvelle-Zélande et en région Bretagne, il convient de prendre de recul vis-à-vis des résultats obtenus. En effet, le modèle MAUVE étant dirigé par les données, ces dernières sont sources d'incertitudes tant sur leur qualité (acquisition, construction ou validation des données) que sur leur utilisation au sein du modèle (appariement des données notamment). Afin de prendre conscience des sources et de la propagation de cette incertitude dans le processus d'optimisation les sources d'incertitudes seront d'abord mises en avant, puis évaluées. Enfin, dans l'objectif d'améliorer les performances de MAUVE, des perspectives seront envisagées.

SOMMAIRE DE CHAPITRE

1. IDENTIFICATION DES SOURCES D'INCERTITUDES	196
1.1. LA MODELISATION CLIMATIQUE.....	196
1.1.1. Les biais et incertitudes.....	197
1.1.2. Les limites des résolutions.....	199
1.2. LES DONNEES DE SOLS ET D'OCCUPATIONS DE SOL	200
2. EVALUATION DE L'INCERTITUDE DANS LE MODELE MAUVE.....	201
2.1. LES MODELES CLIMATIQUES.....	201
2.2. LA DESCENTE D'ECHELLE	204
2.3. LES INDICES BIOCLIMATIQUES	207
2.4. LES DONNEES RELATIVES AUX SOLS	209
3. QUELQUES VOIES D'AMELIORATION DU MODELE MAUVE	211
4. CONCLUSION TROISIEME PARTIE	213

1. Identification des sources d'incertitudes

1.1. La modélisation climatique

La modélisation climatique correspond à des simulations mathématiques (physique atmosphérique) et permet de simuler le climat passé et futur. Si les modèles climatiques et météorologiques utilisent les mêmes équations dans leurs simulations, les modèles météorologiques permettent de simuler le temps à court terme, tandis que les modèles climatiques « *sont appliqués sur de longues périodes afin de prévoir les changements climatiques futurs sur plusieurs centaines d'années* » (Quénol *et al.*, 2021). Ainsi, un modèle climatique permet de simuler un type de temps sans pour autant correspondre à des observations journalières comme le simulerait un modèle météorologique (Quénol *et al.*, 2014, 2021). Les modèles climatiques peuvent être des résolutions spatio-temporelles différentes en fonction de leurs applications :

Modèles climatiques	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Echelle	Application
Global (GCM)	Mailles de 5° à 0.5° (env. 500 à 50 km)	Supérieure à la décennie, jusqu'à plusieurs centaines d'années	Globale	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation de la circulation atmosphérique globale • Modélisation globale du climat • Modélisation du changement climatique
Global à résolution variable (VRGCM)	Basse résolution (>1°) sur le globe avec augmentation progressive de la résolution sur une région d'intérêt (jusqu'à 10-12 km)	Supérieure à la décennie, jusqu'à plusieurs centaines d'années	Globale à régionale	<ul style="list-style-type: none"> • Prévision météorologique • Modélisation globale du climat • Modélisation du changement climatique
Régional (RCM)	De 50 km à 200 m (grilles imbriquées)	Horaire à quelques jours	Régionale à locale	<ul style="list-style-type: none"> • Prévision météorologique • Modélisation atmosphérique méso-échelle

Tableau 18 - Modèles climatiques, résolutions spatio-temporelles et domaines d'application

Source : Quénol *et al.*, 2014

Afin d'intégrer les impacts de l'activité humaine sur le climat, le principal forçage des modèles climatiques est l'estimation des émissions anthropiques sur la variation des concentrations des GES. De ce fait, les scénarios d'émissions de GES sont utilisés en entrée des modèles climatiques afin d'évaluer les potentielles évolutions du climat à l'échelle globale (Quénol *et al.*, 2021).

1.1.1. Les biais et incertitudes

Si l'on constate des écarts conséquents entre les différents scénarios de changement climatique, certaines incertitudes sont inhérentes à la modélisation. En effet, les prédictions des modèles climatiques présentent un premier degré d'incertitude au sens où il n'est pas possible de valider les résultats futurs ; les validations des modèles ne peuvent s'effectuer que sur des données historiques (Quénol *et al.*, 2021 ; Tissot *et al.*, 2017). En modélisation de changement climatique, il est possible d'évoquer quatre grandes catégories d'incertitudes : épistémique, stochastique, réflexive et inhérente à la descente d'échelle (Pagé *et al.*, 2008).

- **L'incertitude épistémique** est relative aux connaissances scientifiques sur le fonctionnement du climat et à l'utilisation des modèles numériques. Bien que le processus et les phénomènes climatiques soient assez connus, les connaissances ne sont pas parfaites et leur intégration/paramétrisation sont différentes d'un modèle à l'autre (Jouzel *et al.*, 2014 ; Pagé *et al.*, 2008 ; Quénol *et al.*, 2021). De fait, si les hypothèses de départ des modèles sont similaires, les résultats peuvent être différents (Quénol *et al.*, 2021). De plus, certains phénomènes plus locaux (inversions thermiques, orages, etc.) sont plus difficiles à intégrer à l'échelle des modèles globaux. Si l'utilisation de modèles régionalisés permet de mieux prendre en compte ces phénomènes, ces modèles ne corrigent pas les modèles d'échelles supérieures (Le Roux, 2017).
- **L'incertitude stochastique** est liée à la variabilité interne du climat et comprend « *la problématique des conditions initiales du système climatique* » (Jouzel *et al.*, 2014 ; Pagé *et al.*, 2008). Du fait des nombreuses interactions climatiques, l'évolution du climat peut avoir un caractère « chaotique » ou du moins aléatoire. En effet, certains phénomènes climatiques irréguliers -*El Niño par exemple*- sont difficiles voire impossibles à prédire, mais ont pourtant une influence non négligeable.
- **L'incertitude réflexive** concerne les scénarios futurs des émissions de GES (Pagé *et al.*, 2008). En effet, les choix politiques, l'évolution des sociétés et les modes de vie associés étant extrêmement difficiles à anticiper (Quénol *et al.*, 2021), l'intégration de scénarios socio-économiques dans les projections climatiques amène un degré

d'incertitude. Si les différents scénarios d'émissions de GES permettent de couvrir un panel assez large d'hypothèses et d'évolutions futures, le niveau d'incertitude n'en demeure pas moins élevé.

Enfin, il convient d'apprécier les **incertitudes liées à la descente d'échelle**, notamment à cause des différences entre les techniques de désagrégation. En effet, « *le choix de la méthode de descente d'échelle, les données utilisées mais aussi la méthode de corrections des biais* » sont sources de plusieurs incertitudes (Quénol *et al.*, 2021).

Boé *et al.* ont résumé l'enchaînement des différentes incertitudes relatif aux études d'impacts de changement climatique en Figure 60 (Boé *et al.*, 2007). Même si de manière générale, les résultats des modèles sont assez similaires, plusieurs disparités notables sont observées dans certaines régions du globe. De même, le niveau d'incertitude est plus important pour les précipitations et les extrêmes climatiques, ce qui explique certains écarts entre modèles (Quénol *et al.*, 2021).

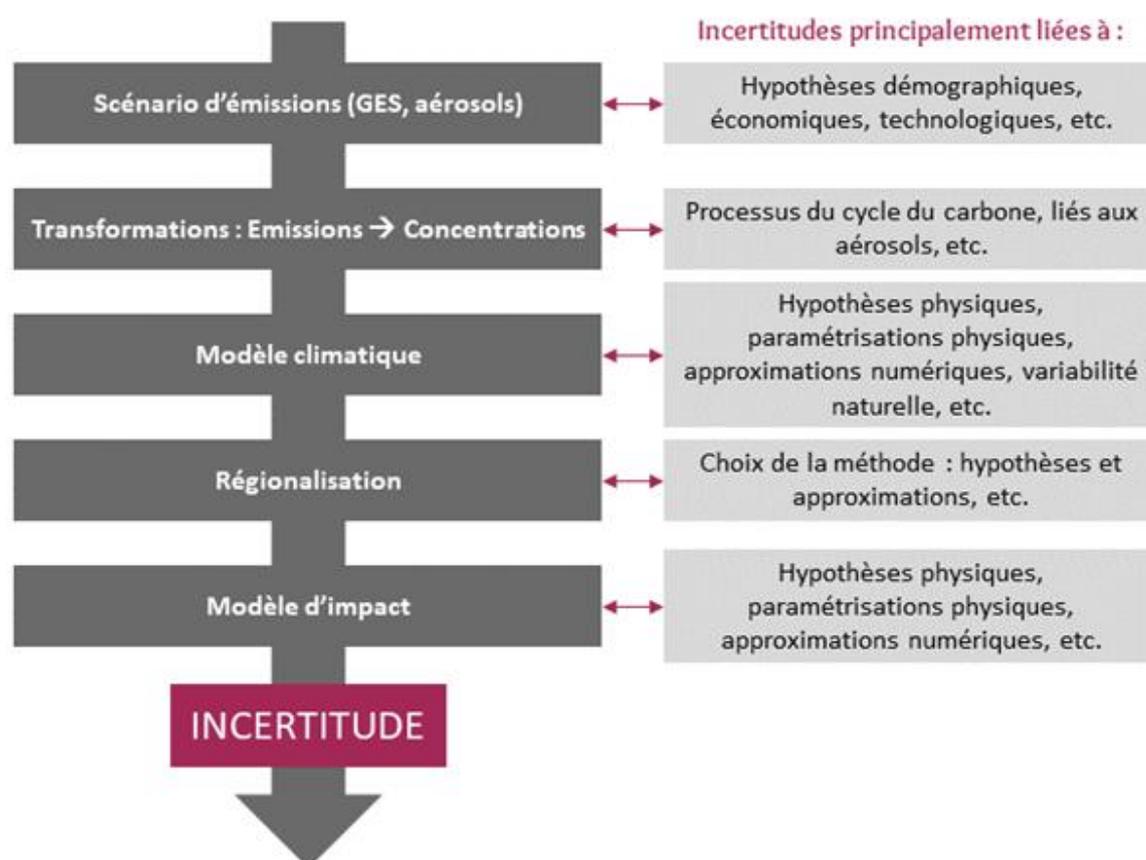


Figure 60 - Enchaînements d'incertitudes relatifs aux études des impacts du changement climatique
Adaptée de Quénol *et al.*, 2021

1.1.2. Les limites des résolutions

Toutes les études de projections futures du changement climatique sont réalisées depuis les données de simulation provenant de différents modèles climatiques. Pourtant, du fait de leur résolution spatiale, les modélisations climatiques régionalisées ne prennent pas en compte l'influence des facteurs locaux tels que la pente, l'altitude, l'exposition, etc. Or, ces variations influencent les conditions climatiques à échelle locale et vont modifier les spécificités de vins produits. A l'image du cas d'application néozélandais, la résolution spatiale utilisée ne permet pas d'enregistrer certains évènements climatiques. Ainsi les simulations réalisées ne révèlent pas d'occurrences de fortes chaleurs ($> 35^{\circ}\text{C}$) alors que la Nouvelle-Zélande y est déjà confrontée (Hamon *et al.*, in prep.). La résolution ne permettant pas de faire ressortir ces évènements, les solutions suboptimales proposées par MAUVE ne prennent pas en compte ce risque. Pour cette raison, il apparaît essentiel d'intégrer les échelles locales dans les sorties de ces modèles, afin d'évaluer les impacts du changement climatique à l'échelle d'un vignoble, voire d'une parcelle. Cependant, les temps de calcul nécessaires à la modélisation climatique d'une dizaine de mètres sont encore très importants, d'autant plus si la région à modéliser est vaste.

Les méthodes statistiques de réduction d'échelle entre les sorties de modèles régionalisés vers les échelles locales sont toutefois moins chronophages que les modèles climatiques dynamiques (Le Roux *et al.*, 2018). L'intérêt et les apports des connaissances des impacts du changement climatique à échelle locale s'illustrent très bien avec l'exemple du vignoble de Cotnari en Roumanie (Quénot *et al.*, 2021). Situé au nord-est de la Roumanie, le vignoble « *est représentatif des régions viticoles à climat continental tempéré* » (ADVICLIM, 2015). Pour différentes études, ce vignoble n'est couvert que par une seule maille de la grille du modèle climatique régionalisé EURO-CORDEX. D'une résolution de 12km, les facteurs locaux ne peuvent pas être pris en compte. Avec une réduction d'échelle statistique permettant une résolution de 150m, une importante variabilité spatiale est mise en avant. En effet, sur la période 2031-2050 et pour les RCP4.5 et RCP8.5, une différence de $250^{\circ}\text{C}/\text{J}$ est observée entre les résultats à résolution de 12km, et l'intégration des données locales avec une résolution de 150m. En parallèle, l'évolution entre la période de référence (1986-2005) et la période de simulation (2031-2050) serait de l'ordre de $200^{\circ}\text{C}/\text{J}$ environ, pour les deux scénarios. Ainsi, la variabilité liée aux facteurs locaux serait plus importante à moyen terme, que le réchauffement global du site.

Ce type de démarche nécessite de disposer d'un réseau de mesure conséquent, implanté en fonction des configurations géographiques locales (topographie, présence de plan d'eau ou de rivière, structuration du paysage...) afin de rendre compte des variabilités observées à échelle fine.

1.2. Les données de sols et d'occupations de sol

Au-delà des incertitudes relatives aux données climatiques, les données de sols et d'occupation de sols doivent également être questionnées. En effet, dès l'initialisation, des contraintes relatives aux sols ainsi qu'à leur occupation sont intégrées dans le modèle MAUVE. Cette étape, qui combine des données d'occupation et de composition des sols, mobilise différentes sources d'informations (observations terrains, sources réglementaires, à dire d'acteurs, etc.) qui sont souvent produites par simulations numériques (géostatistiques, intelligence artificielle, etc.) (Tissot, 2018). Comme le souligne Loiseau *et al.*, « face à l'impossibilité financière de réaliser des cartes à moyenne échelle sur l'ensemble du territoire », la modélisation statistique a été proposée pour la production des cartes à échelle mondiale (Loiseau *et al.*, 2020). Ainsi, la modélisation des sols permet de prédire quantitativement diverses propriétés mais elle permet surtout de produire des prédictions homogénéisées à différentes échelles (nationale, internationale, mondiale, etc.). Ces mêmes arguments s'appliquent à la modélisation de l'occupation de sol qui, en plus du facteur thématique et du facteur spatial, ajoute une dimension temporelle (Bousquet *et al.*, 2013). Les différentes méthodes de modélisation du sol et de son occupation sont moins coûteuses, plus rapides, reproductibles voire automatisées en comparaison à la production de cartes conventionnelles (Loiseau *et al.*, 2020). De même, la modélisation permet d'estimer un certain niveau d'incertitude à l'aide de différents indicateurs (Kappa, F1-score, etc.). Cette information est capitale puisqu'elle permet de juger de la fiabilité de la cartographie et de mettre en évidence les espaces les plus imprécis.

L'incertitude peut alors exprimer plusieurs lacunes : la fiabilité, le nombre ou la densité spatiale des données d'apprentissage. Une forte incertitude peut également signifier une réalité terrain complexe à mettre en relation avec la résolution. La variabilité inter-pixel est, dans ce cas, trop importante et nécessiterait des points d'apprentissage plus nombreux ou une résolution plus fine. Ces imprécisions permettent également de prendre conscience de la propagation d'erreurs potentielles au sein d'un modèle.

De même, au-delà de la « fiabilité des données », Bousquet *et al.* s'interrogent sur les concepts de données et d'informations (Bousquet *et al.*, 2013). Ainsi, comme le souligne l'étude, les

données (*data*) sont définies « *comme le résultat de mesures de certains phénomènes, tandis que l'information (information) découle d'une série d'opérations problématisées de production de sens* » (Bousquet *et al.*, 2013). En effet, si l'on reprend l'exemple des données Corine Land Cover (CLC), une confusion s'opère entre l'usage du sol (*land use*) et l'occupation du sol (*land cover*). Au même niveau de nomenclature, CLC distingue les « prairies », des « espaces verts urbains ». Or, si l'usage définit deux utilisations différentes, l'occupation du sol reste la même à savoir une couverture en herbe. En ce sens, il convient pour tout utilisateur de ce type de données, de juger de l'adéquation des données en fonction des besoins et de ces compétences (Bousquet *et al.*, 2013).

2. Evaluation de l'incertitude dans le modèle MAUVE

2.1. Les modèles climatiques

Comme l'ont souligné les expérimentations des chapitres précédents (CHAPITRE 5, CHAPITRE 6), le fonctionnement du modèle MAUVE est fortement dépendant des données climatiques (résolution, calcul de stades phénologiques, d'exposition aux risques, etc.) intégrées lors de l'initialisation. De fait, les plus grandes incertitudes et limites du modèle sont relatives aux données climatiques utilisées. Que ce soit dans le cas d'application breton ou néozélandais, si les résultats finaux présentent des divergences entre les scénarios d'émissions de GES, les résultats sont également très différents d'un modèle à un autre.

Dans le cas breton, la comparaison des résultats entre deux modèles (IPSL et CNRM) montre des trajectoires sensiblement différentes. Pour l'indice de Huglin par exemple, si des espaces étaient considérés comme « tempérés » à moyen terme avec le modèle CNRM, le modèle IPSL considère l'ensemble du Finistère ainsi que la partie ouest des Côtes d'Armor comme « très frais » sur l'ensemble de la période de simulation (Figure 61).

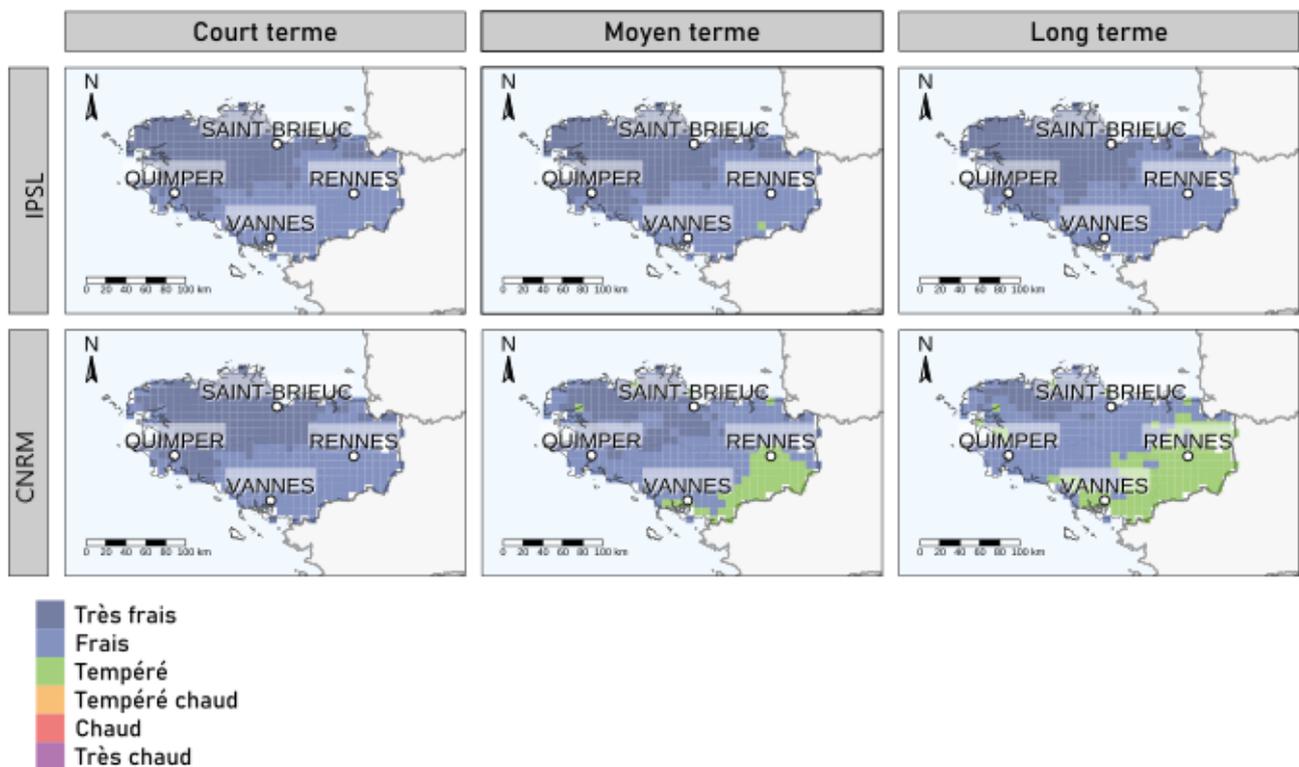


Figure 61 - Comparaison indice de Huglin à court (2021-2040), moyen (2041-2060) et long terme (2081-2100), pour le RCP4.5 et les modèles IPSL et CNRM

Données : IPSL et CNRM, RCP4.5

Ainsi, en utilisant le même scénario (mêmes objectifs, contraintes et seuils), les résultats relatifs à l'implantation suboptimale des vignobles sont très différents entre le modèle IPSL et le modèle CNRM (Figure 62). En effet, à moyen et long terme, le modèle CNRM estime que les zones suboptimales pour l'implantation de la vigne seraient situées sur le littoral sud-ouest de la Bretagne avec une grande majorité de Pinot noir, Merlot ou Gamay. Quelques mailles concentrées sur la côte morbihannaise seraient plus adaptées à du Cabernet Franc, du Syrah ou du Grenache. Selon les résultats du modèle ISPL, seuls le Pinot noir, le Merlot ou le Gamay semblent adaptés, quel que soit l'horizon temporel. Pour ce dernier modèle, le sud de la région semble particulièrement adapté, notamment la bordure littorale sud, le sud de l'Ille-et-Vilaine et le sud et l'ouest du Morbihan.

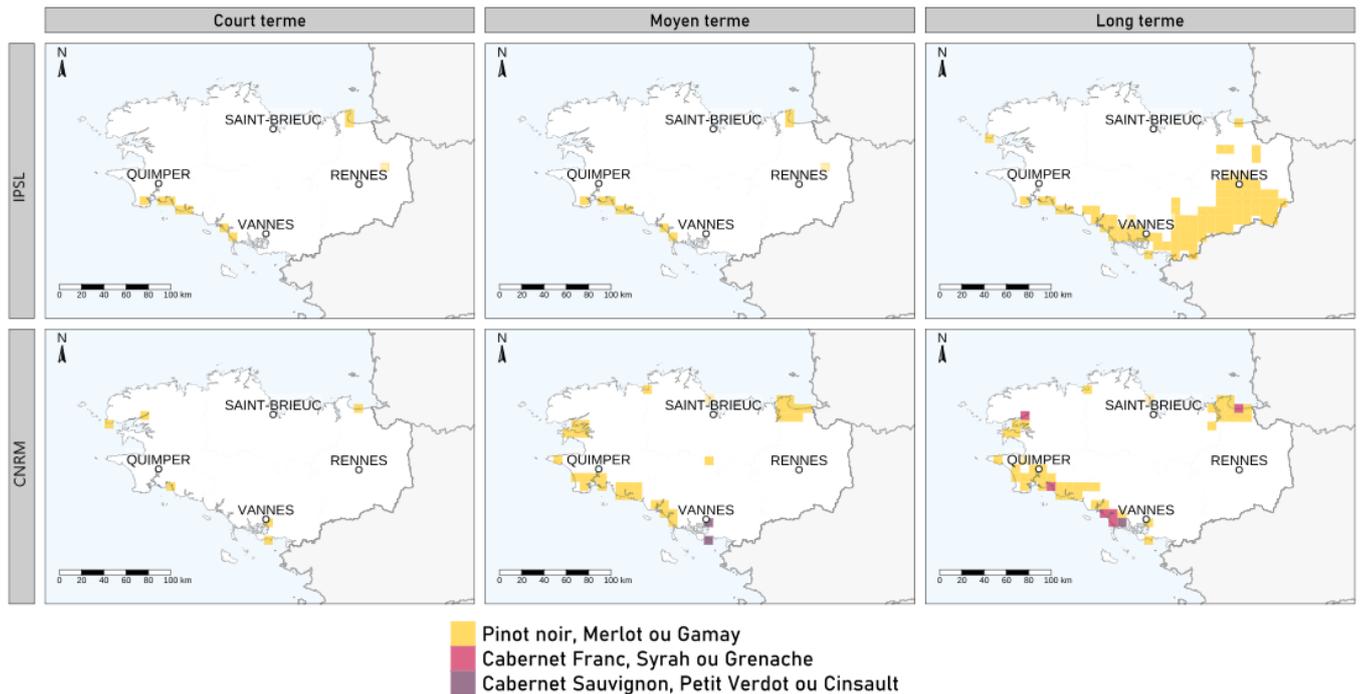


Figure 62 – Comparaison des solutions suboptimales par MAUVE des modèles climatiques IPSL et CNRM, pour la région Bretagne à court (2021-2040), moyen (2041-2060) et long terme (2081-2100)
Données : IPSL et CNRM, RCP4.5

Outre le choix du modèle, la méthode de correction des biais et le processus de réduction d'échelle comportent des hypothèses et des limites inhérentes, comme le décrivent Trasher *et al* (Thrasher *et al.*, 2022). Si la correction des biais permet de réduire certaines erreurs des modèles climatiques, les incertitudes relatives aux projections subsistent. Pour pallier ces incertitudes, des études suggèrent de combiner plusieurs modèles climatiques (Massoud *et al.*, 2019 ; Raju et Kumar, 2020 ; Tegegne *et al.*, 2020). Cependant, ces méthodes nécessitent d'importantes ressources informations et sont très chronophages, d'autant que les extrêmes climatiques sont difficiles à représenter dans ce genre d'approche (Tegegne *et al.*, 2020). Ainsi, afin de limiter les biais inhérents à l'utilisation des modélisations climatiques, il convient pour l'utilisateur de s'informer et de prendre conscience de ces différentes incertitudes. A l'instar du cas d'application néozélandais présenté dans cette thèse, une approche comparative entre les données projetées et les données observées peut être réalisée, afin de déterminer le modèle le plus adapté à la zone d'étude (Hamon *et al.*, in prep.).

2.2. La descente d'échelle

Avec une résolution d'une vingtaine de kilomètres, les variations locales des températures ne sont pas –ou mal- représentées par les projections climatiques. Or, dans un contexte topographique accidenté, les températures peuvent rapidement varier. En Nouvelle-Zélande, Par exemple, MAUVE ne comptabilise pas d'occurrences supérieures ou égales à 35°C, qu'importe l'horizon temporel ou le scénario. Or, la Nouvelle-Zélande connaît déjà des journées chaudes. A l'avenir, il semble donc probable que l'île du Sud connaisse des vagues de chaleur, mais la résolution des données climatiques ne permet pas de capturer toute la variabilité.

Afin de pouvoir tester le modèle MAUVE selon différentes configurations, une descente d'échelle statistique a été effectuée sur les données climatiques à l'échelle du Golfe du Morbihan. Si les solutions suboptimales du modèle MAUVE ont mis en avant différents compromis à moyen et long terme (Figure 58), les résultats relatifs au bilan héliothermique d'Huglin (Figure 63) et aux occurrences d'évènements extrêmes (

Figure 64) ne font apparaître aucune variabilité. Cette absence de variabilité confirme les biais potentiels inhérents à une méthode de descente d'échelle statistique : les données à haute résolution ont été « lissées » lors de la réduction d'échelle. Sur les 23 stations MétéoFrance implantées à l'échelle du département et utilisées pour l'apprentissage de l'algorithme, 13 stations sont situées à plus de 10 km de la bordure littorale, et seulement 6 stations sont situées dans la zone d'étude. Cette répartition spatiale ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des configurations spatiales et des variations locales du climat. Il en résulte une perte d'information dans la variabilité des températures restituée par le modèle SVM. Dans le cadre du programme ADVICLIM, l'application de ce même modèle, à plusieurs vignobles européens à montrer qu'un réseau d'observation implanté en fonction des configurations géographiques locales, permettait d'obtenir une restitution satisfaisante de cette variabilité (cf. exemple de Cotnari présenté précédemment).

Si le réseau de mesures mis en place dans le cadre de l'IRP VINADAPT permet de mieux caractériser les configurations spatiales et les variabilités climatiques locales, le recul historique actuel n'est pas suffisant pour enrichir la méthode de descente d'échelle statistique.

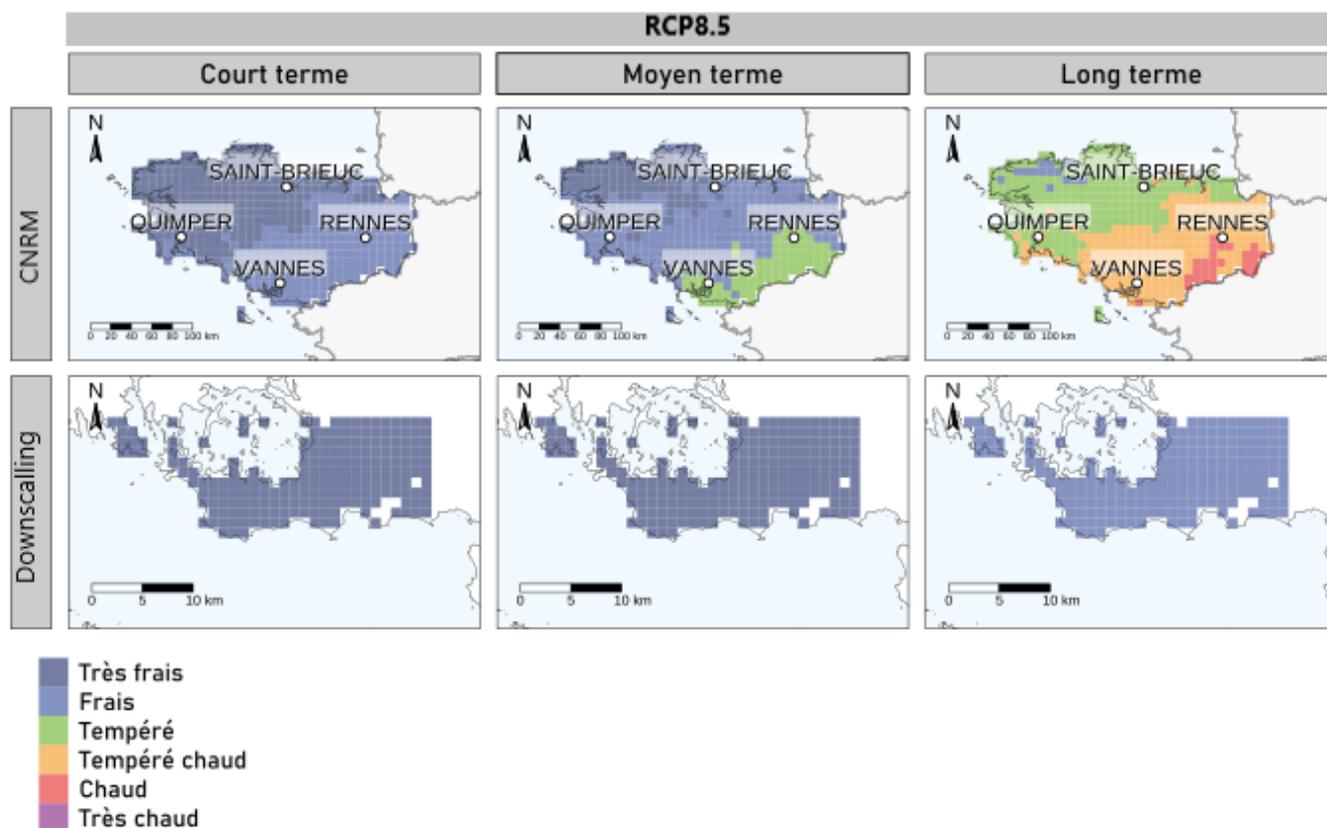


Figure 63 - Indice de Huglin calculé à court terme (2021-2040), à moyen terme (2041-2060) et à long terme (2081-2100) en région Bretagne et dans le Golfe du Morbihan pour le RCP8.5
Données : CNRM

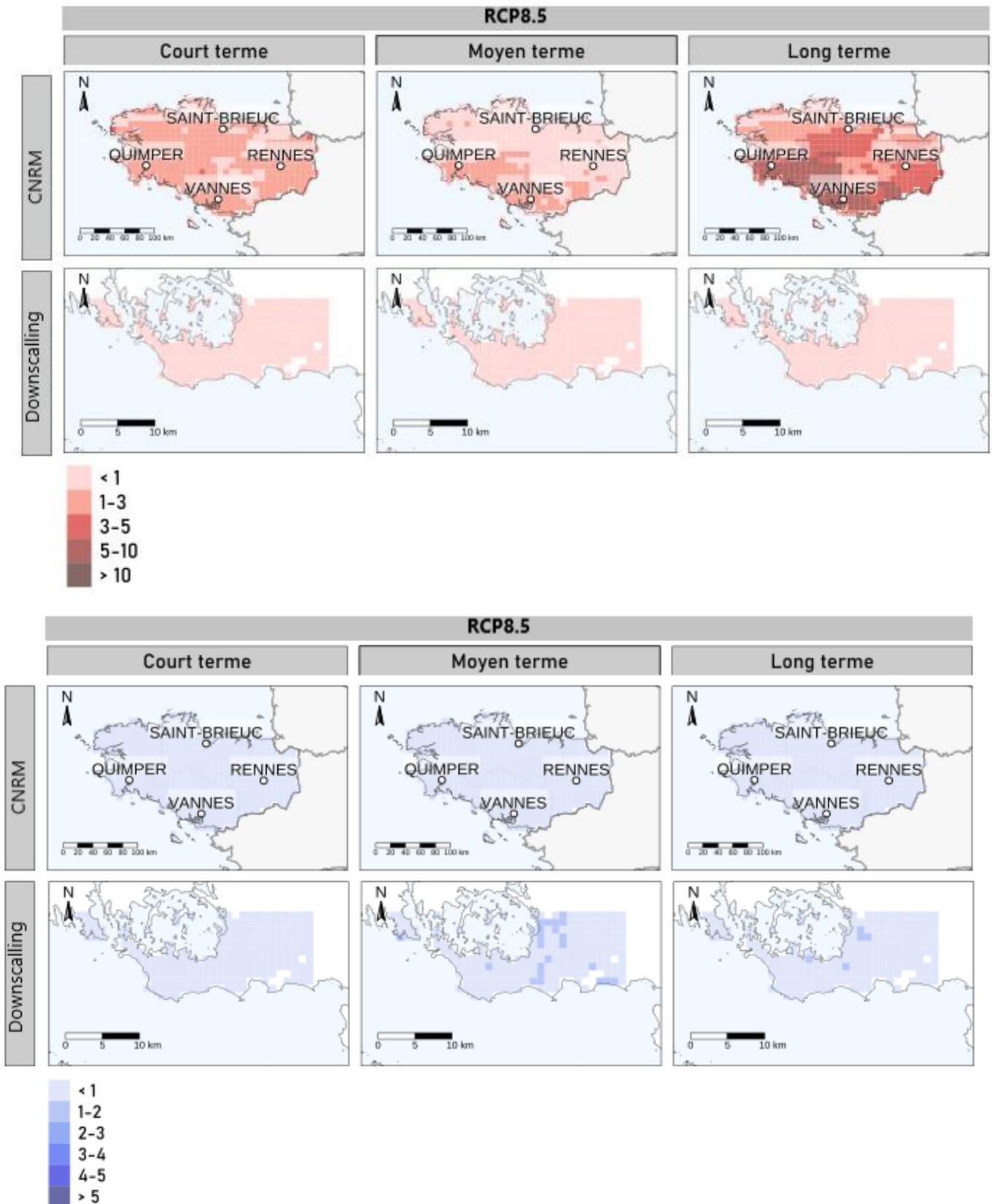
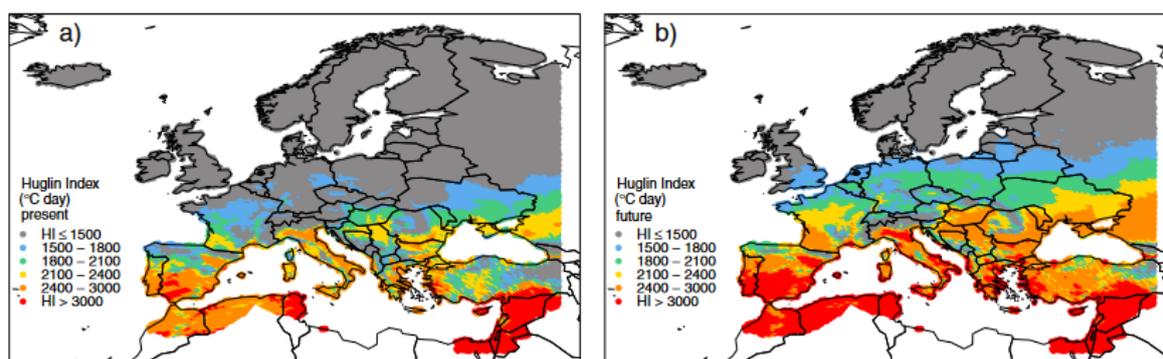


Figure 64 - Nombre moyen a) de jours de forte chaleur (>35°C) et b) d'épisodes gélifs (<0°C) entre le débourrement et la maturité techniques du Cabernet Sauvignon, Petit Verdot ou Cinsault à court terme (2020-2041), moyen terme (2041-2060) et long terme (2061-2100).

Données : CNRM

2.3. Les indices bioclimatiques

L'évolution climatique contemporaine a impacté le cycle végétatif de la vigne, et donc directement son fonctionnement, mais également les caractéristiques du vin (hausse du taux d'alcool, baisse de l'acidité, etc.). Les indices bioclimatiques (Winkler, Huglin, indice de fraîcheurs de nuits, etc.) permettent d'appréhender les potentielles évolutions de différentes régions viticoles, par rapport à des périodes de références. Ainsi, les différentes études relatives à l'évolution des indices bioclimatiques mettent en avant d'importants changements d'ici la fin du siècle (Fraga *et al.*, 2014 ; Hannah *et al.*, 2013). En Europe, par exemple, les régions viticoles méditerranéennes actuelles (sud du Portugal et de l'Espagne, sud de l'Italie, Grèce, etc.) présentent des valeurs d'indice de Huglin trop élevées pour la culture de la vigne, à horizon 2046-2070 (RCP8.5) (Cardell *et al.*, 2019). A l'inverse, avec le même scénario et pour le même horizon temporel, les régions nord-européennes telles que le nord de la France, l'Allemagne, le sud de l'Angleterre, etc., seraient dans des conditions plus favorables (Cardell *et al.*, 2019).



Source : Cardell *et al.*, 2019

Cependant dans un contexte de changement climatique global, ces indicateurs présentent certaines limites puisqu'ils ne prennent pas en compte la capacité des viticulteurs à s'adapter (Quénot *et al.*, 2021). En effet, même si certaines régions ont atteint leur optimum thermique pour la culture de la vigne, le vin produit n'en reste pas moins de bonne qualité (van Leeuwen *et al.*, 2013). Des adaptations peuvent être mise en place par le viticulteur afin de pallier ces évolutions en modifiant le matériel végétal (variété, clone, porte-greffe), les techniques de gestion de la vigne (dates des récoltes, architecture de la vigne, gestion de la canopée, gestion du sol, irrigation, etc.) ou encore une modification des choix de site (Leeuwen et Destrac-Irvine, 2017).

De plus, ces indices bioclimatiques sont relativement anciens, et ne prennent pas en compte l'évolution du climat. Par exemple, pour l'indice de fraîcheur des nuits, le calcul est effectué sur le mois de septembre afin de correspondre aux pré-vendanges. Or, depuis plusieurs années, un décalage des différents stades phénologiques clés de la vigne (débourrement, floraison, véraison, etc.) est observé dans plusieurs régions viticoles dans le monde. La précocité des stades s'accompagne d'un raccourcissement de la période de croissance, notamment entre la floraison et la maturité des raisins (Jones et Davis, 2000 ; Webb *et al.*, 2011). Avec l'avancée des stades phénologiques et donc de la maturité, la date des vendanges a d'ores et déjà évolué, et dans certaines régions du monde soumises à réchauffement important, ce calcul peut largement être remis en cause.

Afin de définir l'adéquation des cépages aux conditions climatiques futures, des indices écoclimatiques ont été développés à partir de modèles phénologiques. En utilisant la température de l'air, ces indices (GFV, GSR) permettent de définir différents stades phénologiques en fonction de différents cépages et de conditions thermiques. Avec un indice de confiance associé à chaque cépage, ces indices permettent de mieux appréhender et mesurer l'incertitude des résultats (Parker *et al.*, 2020a, 2020b). En comparant les indices bioclimatiques (Huglin, Winker et AGST) et les indices écoclimatiques (GFV et GSR) issus des projections régionalisées des scénarios RCP4.5 et RCP8.5, les résultats ont démontré une diminution de l'incertitude avec les indices écoclimatiques (Parker *et al.*, 2020a).

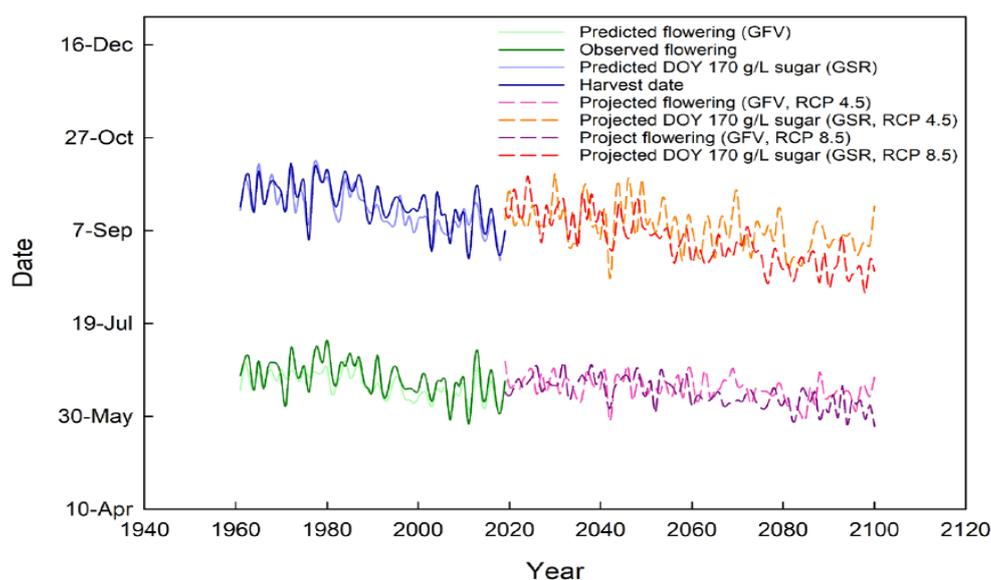


Figure 66 - Simulation et validation de la date de floraison par le modèle GFV, et de la concentration en sucre de 170 g/l par le modèle GSR pour le Chardonnay, en Champagne, France, pour les RCP4.5 et RCP8.5, entre 1960 et 2100

Source : Parker *et al.*, 2020b

Cependant, si ces indices permettent de mieux appréhender la capacité d'adaptation des cépages aux futures conditions climatiques (Figure 66), ils ne prennent en compte que des variables de températures dans leurs calculs et omettent la capacité d'adaptation des viticulteurs. Or, à échelle locale, des pratiques peuvent être menées à différents horizons temporels afin de faire face aux effets du changement climatique, et pour maintenir une composition correcte du raisin. A court terme par exemple, des solutions d'adaptation consistent à adapter la date des récoltes (contrôle des tailles, effeuillages, etc.), à contrôler la température des raisins cueillis afin de limiter les processus d'altération (récolte de nuits, transport réfrigéré, etc.) ou encore à gérer le travail du sol afin de contrôler la vigueur de la vigne (ADVICLIM, 2017). Au-delà des conditions climatiques, le développement, la maturité des vignes, ainsi que la composition des raisins peuvent également être influencés par des actions humaines.

2.4. Les données relatives aux sols

Les contraintes relatives aux sols ont un caractère disjonctif dans MAUVE, ce qui signifie que si la condition n'est pas strictement respectée, elle est écartée définitivement du processus. Il pourrait donc être envisagé d'assouplir cette règle. Effectivement, actuellement si une maille satisfait l'ensemble des objectifs mais que son occupation du sol n'est pas strictement agricole, ou que le sol n'est pas adapté selon la nomenclature choisie, la maille est écartée. Or, dans certains scénarios, il pourrait être envisagé qu'en cas de solution acceptable sur l'ensemble des objectifs, les contraintes d'occupation du sol ou de composition de sol pourraient être des caractères limitants et non excluants. Pour peu que les aspects financier, juridique, éthique, etc., jugent la solution acceptable, rien n'empêche de passer une friche ou une forêt en parcelle de vignes, ou de travailler le sol afin de le rendre plus drainant. De même, tel qu'elle est implémentée actuellement, l'occupation du sol est binaire (adapté et non adapté à la viticulture). Des gradients spatiaux pourraient ainsi être envisagés en utilisant des zones tampons par exemple. Les mailles situées à proximité d'un espace excluant la viticulture pourraient devenir propices au fur et à mesure de l'éloignement à cet espace. Par exemple, si l'on souhaite interdire l'usage de produits phytosanitaires à proximité de lieux sensibles comme les hôpitaux ou les écoles, ce gradient pourrait être intéressant en passant d'un espace strictement interdit, à autorisé si les objectifs sont remplis à X%.

Au-delà de ce caractère binaire, la façon dont sont intégrées les données de sol (occupation et composition) dans le modèle MAUVE peut être sujette à des incertitudes. La résolution des

résultats du modèle est dépendante de la résolution des données climatiques. Ainsi, les données de sol à résolution plus fines sont agrégées de manière à correspondre à la résolution plus grossière des données climatiques. Cette méthode soulève un problème d'agrégation spatiale, bien connu en géographie, dénommé MAUP pour modifiable areal unit problem. Un MAUP « décrit la vulnérabilité des résultats des analyses cartographiques ou statistiques et de toute forme de modélisation spatiale par rapport à la définition des unités territoriales étudiées » (Madelin *et al.*, 2009). Ainsi, en agrégeant des données à une échelle plus grossière, en plus d'une perte d'informations, l'interprétation des données peut être source d'erreurs (Figure 67).

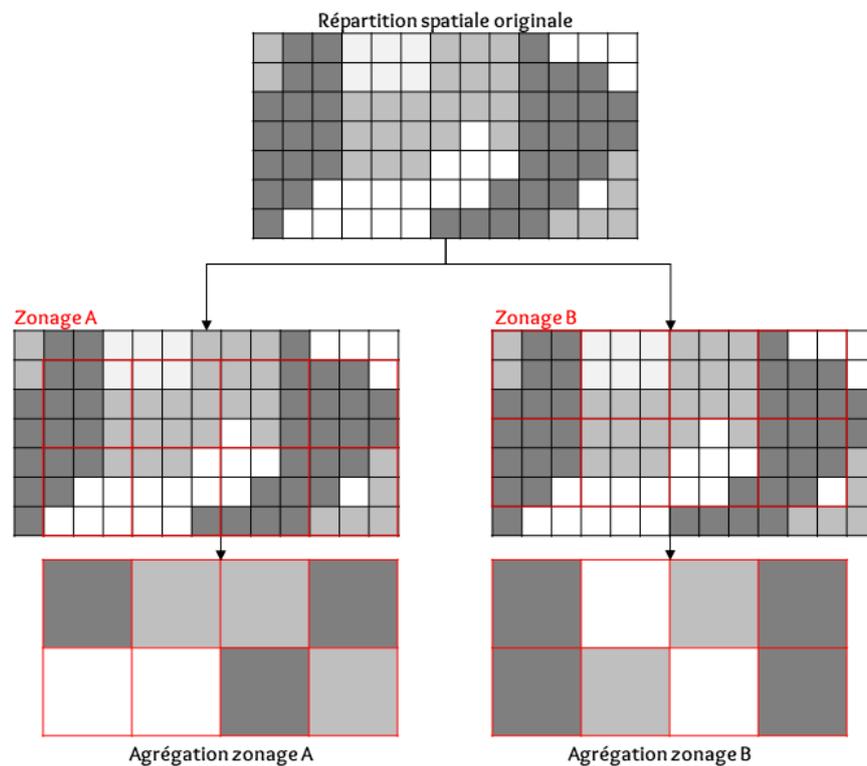


Figure 67 - Influence du zonage sur l'agrégation des données

Adaptée de Madelin *et al.*, 2009

3. Quelques voies d'amélioration du modèle MAUVE

Le cadre méthodologique et conceptuel de l'optimisation spatiale multi-objectifs nécessite un minimum de connaissances préalables sur les données, les objectifs à atteindre et leurs seuils (Schweidtmann *et al.*, 2020). Les résultats présentés par le modèle MAUVE correspondant à une combinaison de contraintes et d'objectifs, le changement d'un seuil ou d'une règle de contrainte impacte directement les résultats. Sur le plan agroclimatique, MAUVE utilise principalement les données de températures pour fonctionner en calculant les différents stades phénologiques, les niveaux de maturités ou les risques climatiques tels que l'exposition aux agents pathogènes, les occurrences d'épisodes gélifs ou aux fortes chaleurs. Cependant, d'autres variables climatiques influencent le développement de la vigne et du vin comme le vent (Bonnardot *et al.*, 2005) ou les précipitations (van Leeuwen *et al.*, 2009). Difficiles à prendre en compte dans les calculs, les projections de ces variables sont également beaucoup discutées, mais négliger leur rôle dans le développement de la vigne amène une part de biais. Par exemple, la brise de mer qui pourrait être un avantage majeur dans les années à venir, est difficile à modéliser et son influence difficilement mesurable dans les projections climatiques. Les embruns pouvant occasionner des dégâts sur les feuilles de vignes sont très dépendants du vent, mais sont également difficile à modéliser. Ainsi, si la modélisation peut être résumée comme « *une simplification de la réalité utilisée pour mieux comprendre les situations réelles* » (Chartoire, 2010), il convient de garder à l'esprit que les approches ne peuvent pas prendre en compte l'ensemble des processus et mécanismes inhérents à un domaine ou une activité. Par conséquent, les résultats pourront toujours présenter des biais.

Le calcul des dates des stades phénologiques pourrait également être amélioré. Actuellement, le modèle estime qu'un stade phénologique est acquis dès lors qu'un cumul de degré jours est atteint. Non seulement ce cumul peut être discuté du fait de l'incertitude des données climatiques (cf. CHAPITRE 3), mais il considère aussi que le végétal est homogène. Pour le débourrement par exemple, une différence de quelques jours peut avoir un impact très important pour la vigne : en cas de gel, les vignes ayant déjà débourrées sont plus vulnérables que celles qui vont débourrer une semaine plus tard. De même, la maturité fait référence à un seuil à atteindre grâce à l'indice GSR. Si une limite maximale de maturité est fixée au 15 avril pour l'hémisphère sud et au 1^{er} septembre pour l'hémisphère nord, aucune date minimale n'est fixée. Ainsi, si la maturité recherchée est toujours atteinte très tôt dans la saison, plusieurs solutions

sont possibles : soit le niveau de sucre peut être augmenté afin d'obtenir une maturité plus tardive (indice GSR supérieur), soit le cépage n'est pas/plus adapté et un changement de cépage est nécessaire.

Au-delà des aspects techniques du modèle MAUVE, une amélioration importante pourrait être apporté d'un point de vue fonctionnel. Actuellement, MAUVE n'est utilisable qu'en ligne de codes et laisse peu de possibilités d'utilisation par des non-initiés à la programmation. Or, l'un des intérêts de MAUVE réside dans la possibilité de (co)créer divers scénarios et d'intégrer différentes visions. Son utilisation et sa prise en main seraient donc grandement simplifiées avec un système plus interactif et intuitif.

4. Conclusion troisième partie

Au-delà des potentialités agronomiques et des évolutions climatiques, d'autres facteurs peuvent favoriser ou évincer la culture de la vigne. L'occupation du sol ainsi que sa composition sont des facteurs essentiels, mais pourtant peu pris en compte dans les études prospectives du climat. Outre ces aspects, les visions prospectives peuvent également être de diverses natures : recherche de maturités différentes, objectifs environnementaux, économiques, intégration paysagère, etc. Si ces variables ne sont pas, ou peu, prises en compte, elles peuvent fortement influencer les potentialités d'adaptations et d'implantation des vignobles. En ce sens, le caractère générique et la phase de scénarisation de MAUVE permettent la prise en compte de ces différentes variables.

Les différentes applications de MAUVE ont permis de tester sa généricité et sa transposabilité. Appliqué dans différentes configurations, le modèle MAUVE permet de mieux appréhender les impacts du changement climatique en simulant des trajectoires d'évolutions viticoles dans les régions existantes, ou en identifiant des espaces de nouvelles opportunités et de moindres contraintes dans les régions émergentes. Au travers de ces résultats, MAUVE a également permis de confirmer les potentialités des îles et du littoral aux échelles régionales. A échelle locale, les différentes contraintes relatives à l'occupation du sol notamment, ont confirmé l'intérêt de l'utilisation de ce type de modèle : au-delà des aspects agroclimatiques, l'implantation d'une culture nouvelle est conditionnée par un ensemble de contraintes locales qui peuvent remettre en question la pertinence de l'activité viticole pour ces espaces.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

En s'intéressant à l'étude de la viticulture littorale et insulaire dans un contexte de changement climatique, cette recherche doctorale visant à répondre à une question centrale : les espaces littoraux et insulaires sont-ils des zones d'implantation durable pour la viticulture ? A travers cette problématique, l'objectif sous-jacent tendait à développer une méthode permettant de modéliser les évolutions potentielles de la viticulture, dans un contexte de changement climatique. En ce sens, nous avons cherché à 1) comprendre les spécificités agroclimatiques des espaces littoraux et insulaires, 2) proposer une approche de modélisation permettant d'identifier des zones d'implantation optimales dans un contexte de changement climatique, 3) tester cette approche et ses limites à travers deux cas d'applications aux configurations et aux enjeux très différents.

La première partie de cette thèse, constituée d'une étude bibliographique de la diversité des conditions agroclimatiques des vignobles, a démontré une relation très étroite entre la vigne et le climat, notamment en relation avec l'évolution des températures. Cette relation fait de la viticulture, une pratique agricole très sensible au changement climatique : l'adaptation aux futures conditions climatiques est cruciale pour la culture de la vigne. Face à ces modifications climatiques, les viticulteurs adaptent leurs pratiques et stratégies de production afin de conserver un niveau de qualité et de style de vin. A plus long terme, l'adéquation des cépages et la stabilité économique des régions viticoles traditionnelles pourraient être remises en question. En 2019, une étude prospective portant sur les stratégies de la viticulture face au changement climatique a ainsi présenté quatre scénarios d'adaptation envisageables (Aigrain *et al.*, 2019). Parmi ces stratégies, le scénario « nomade » envisage la culture des vignobles à de plus hautes altitudes, voire l'implantation de vignobles dans des secteurs plus septentrionaux.

En écho à ce scénario nomade, et dans ce contexte d'augmentation des extrêmes climatiques, les espaces littoraux et insulaires présentent des spécificités qui pourraient renforcer leur attractivité dans les années à venir. Les spécificités climatiques de ces espaces pourraient être des avantages majeurs pour l'agriculture dans les années à venir. En effet, l'effet modérateur de l'océan (inertie thermique) ou encore les brises de mer permettent de réguler les températures extrêmes en comparaison à des sites plus continentaux. Les températures moyennes plus douces à proximité de l'océan (moins d'épisodes gélifs et de vagues de chaleur) semblent constituer

des atouts non négligeables pour la viticulture dans les années à venir. Si plusieurs exemples de vignes littorales et insulaires illustrent ces potentialités, les configurations rencontrées sont très diverses : des îles-pays aux productions de grands volumes, aux vignobles anciens et spécifiques aux productions plus modestes et « typiques », en passant par les nouveaux vignobles implantés pour de futures potentialités, toutes ces configurations tirent profit de la proximité de l’océan.

Pour autant, les configurations des espaces proches du rivage sont très complexes puisque diverses activités doivent cohabiter sur des espaces restreints : activités touristiques et de loisirs, résidences et logements secondaires, agriculture, etc. L’attrait pour le littoral est bien réel, ce qui en fait des espaces très prisés, concurrentiels et dont les prix du foncier sont en constante augmentation. En parallèle, les zones côtières sont des espaces qu’il convient de protéger de l’érosion, des risques de submersion, etc. En ce sens, la question de l’intégration des vignobles dans ces espaces déjà fortement contraints est cruciale.

Dans la perspective de mieux comprendre si les espaces littoraux et insulaires peuvent être des territoires d’avenir pour la viticulture, le modèle MAUVE (Modélisation de l’Adaptation sUboptimale des Vignobles Emergents et existants) propose un cadre générique de modélisation multiobjectifs. En s’inspirant de différentes techniques de l’optimisation multiobjectifs, ce modèle permet de pallier plusieurs limites inhérentes à ce domaine de l’optimisation (non prise en compte des relations spatiales et des imbrications d’échelles, recherche de valeurs inconnues, etc.).

Le modèle MAUVE permet ainsi d’identifier les espaces suboptimaux à la culture de la vigne, en fonction d’un scénario établi par l’utilisateur. Dans les régions déjà implantées en vignes, il est possible de prendre en compte les vignobles actuels. Le modèle tend alors à évaluer les espaces les plus favorables à la viticulture, en fonction d’une ou plusieurs projections de changement climatique et des cépages déjà implantés. Pour les régions viticoles émergentes, les simulations mettent en avant les espaces les plus adaptés en fonction d’une sélection de cépages et des contraintes et objectifs choisis pour le scénario implémenté. Les solutions issues de l’optimisation présentent les différents compromis possibles entre ces contraintes et ces objectifs. Elles fournissent donc un panel de solutions pertinentes au regard du scénario spécifié et permettent d’identifier les espaces à privilégier dans le cas d’une prospection ou d’évaluer les changements dans la distribution spatiale des zones viticoles existantes.

A travers les résultats mis en avant dans les expérimentations présentées en troisième partie, la question de la place potentielle des vignobles littoraux et insulaires semble plus simple à appréhender. En effet, que la modélisation soit sur une région viticole existante comme la Nouvelle-Zélande ou émergente comme la Bretagne, France, les résultats des scénarios semblent converger : dans un contexte de hausse des températures, les espaces insulaires et littoraux se distinguent par leurs potentialités agroclimatiques. Si ces résultats semblent assez cohérents au vu des éléments discutés en première partie, il subsiste de nombreuses incertitudes relatives aux données ainsi qu'au processus de modélisation. Les principales sources d'incertitudes sont inhérentes aux données climatiques (modèles climatiques, résolutions, descentes d'échelle statistiques notamment) et aux données de sols et d'occupations du sol (fiabilité et conception des données).

De même, comme le démontre les résultats présentés à échelle régionale, les espaces proches du rivage semblent adaptés à la culture de la vigne pour les prochaines années. Cependant, avec les résultats à plus haute résolution, les espaces directement en contact avec l'océan ne semblent plus être considérés comme les meilleurs compromis par le modèle. En effet, si les espaces littoraux et insulaires semblent adaptés aux conditions climatiques futures, les contraintes de disponibilités de l'espace sont très importantes aux échelles locales. Les pressions (anthropiques, foncières, économiques) qui s'exercent localement influencent directement les configurations et ne permettent pas d'identifier clairement les espaces comme des compromis judicieux pour la culture de la vigne. Ainsi, si les espaces littoraux et insulaires peuvent être identifiés comme des espaces de potentialités viticoles dans la plupart des régions du globe, dans la majeure partie des cas, les diverses pressions exercées localement écartent ces espaces des solutions optimales pour la viticulture. Ce constat renforce le besoin de considérer l'ensemble des interactions entre facteurs abiotiques, biotiques et anthropiques (Neethling, 2016) dans la perspective d'identifier des zones d'optimalités pertinentes aux regards des configurations locales en particulier sur les îles et le littoral.

De ce travail de travail de recherche, la première perspective concerne directement les verrous liés à l'incertitude et vise à améliorer la qualité des données. Avec les résultats présentés en troisième partie, les scénarios et les objectifs (maturité, risque pathogène, épisodes de gel et de chaleur) sont axés sur les données climatiques. Or, comme précédemment évoqué, les projections sont soumises à de nombreuses incertitudes. Outre le choix du modèle et l'impossibilité de valider des données futures, la résolution de ces projections est limitée.

Comme le souligne **Morin**, « *la majorité des études climatiques menées dans des régions viticoles mobilisent soit des données d'observation avec une résolution fine mais avec une couverture spatiale et une historicité limitées, soit avec des sorties de modèles climatiques ayant une résolution spatiale relativement large* » (**Morin, 2022**). S'il convient d'utiliser des résolutions spatiales en adéquation avec l'échelle d'application, les modèles dynamiques numériques ne sont pas suffisamment fins pour représenter au mieux les variabilités spatiotemporelles des températures à haute résolution. A l'instar des études sur le vignoble de Cotnari en Roumanie (**ADVICLIM, 2015 ; Quénot et al., 2021**), une descente d'échelle statistiques semble pertinente. Cette descente d'échelle statistiques a permis de représenter les différentes variabilités spatiales locales grâce à une résolution de 150m.

Cependant, si la descente d'échelle semble être une méthode adaptée pour affiner les résolutions spatiales des projections, les réseaux de mesures aux échelles fines nécessitent des moyens informatiques, humains et financiers conséquents, et l'acquisition de données doit être réalisée sur plusieurs années (**Le Roux, 2017**). L'utilisation de la télédétection pourrait palier ces coûts financiers, humains et temporels conséquents. En effet, la télédétection thermique (infrarouge thermique) couplée à des facteurs topographiques permet de caractériser les variabilités climatiques multi-scalaires. De plus, les séries temporelles issues des observations satellitaires ont une couverture spatiale globale et sont accessibles gratuitement. Les résolutions temporelles et spatiales de ces séries temporelles sont « *adaptées ou adaptables aux échelles fines* » (**Morin, 2022**).

D'un point de vue du fonctionnement de MAUVE, actuellement, seuls des objectifs climatiques sont implémentés. L'ensemble du processus repose donc sur ces données et en particulier sur les températures. A l'avenir, des objectifs différents pourraient être ajoutés et permettraient d'élargir le champs d'application du modèle : objectifs d'intégration du paysage, d'empreinte carbone, économique, d'identité paysagère et culturelle, etc. L'une des plus grandes limites à l'intégration repose sur la transformation mathématique de ces objectifs. Il apparaît difficile d'écrire l'équation mathématique de l'intégration paysagère ou l'identité culturelle d'une région... De même, il pourrait être intéressant d'objectiver des coûts (financier, écologiques, etc.). Pour cela, les actions menées dans le vignoble devraient être couplées aux calculs de stades phénologiques et aux risques climatiques : en cas de fortes chaleurs retarder l'effeuillage, intégrer les différents types de tailles, etc. En l'état actuel, MAUVE ne peut pas calculer ces actions potentielles ; en effet, elles sont relatives à la gestion du vignoble et dépendent directement des actions du viticulteur. Pour pallier ce manque, l'utilisation d'un modèle multi-

agents pourrait être à privilégier. Le modèle SEVE (Simulating Environmental impacts on Viticultural Ecosystems) permet, par exemple, de prendre en compte la gestion du vignobles et les adaptations potentielles (Tissot *et al.*, 2017). Ce modèle multi-agent a été développé pour décrire des pratiques viticoles contraintes par des variables exogènes telles que les variables biophysiques, socio-économiques ou réglementaires. SEVE et MAUVE ayant été pensés à pas de temps journalier, le couplage des deux modèles semble très pertinent et permettrait de comprendre l'évolution de la viticulture et d'identifier de nouvelles opportunités en prenant en compte les variables climatiques, les moyens humains, financiers, réglementaires ou encore écologiques.

Au-delà du champ viticole, MAUVE serait à même d'intégrer d'autres cultures. Si cette thèse est portée sur l'intérêt spécifique de la vigne, la viticulture n'est pas la seule pratique agricole à subir les impacts du changement climatique. Dans un contexte global où les conditions climatiques sont amenées à évoluer, l'intégralité du monde agricole doit repenser ses pratiques et stratégies de production. Or, la phénologie de tous les végétaux est régie par la variabilité des températures, et il existe de nombreux indicateurs pour suivre la phénologie de diverses cultures.

Enfin, les événements socio-économiques de ces dernières années (crise sanitaire, économiques, politiques, etc.) tendent à remodeler nos habitudes de consommation. Par exemple, la hausse des coûts de production entraîne de nombreuses fermetures d'élevage, les différents conflits entraînent la fermeture des ports et le ralentissement des trafics maritimes ce qui impactent directement les imports/exports des matières premières. L'ensemble de ces éléments entraînent une hausse significative des prix des matières premières. Ces bouleversements remettent en question la place et le rôle de l'agriculture au sein de nos sociétés, et sous-tendent vers une autre problématique quant aux cultures de demain. Repenser l'agencement et les différents usages agronomiques des territoires sont de réels enjeux d'avenir pour l'adéquation et l'équilibre des cultures (polycultures, cultures locales, assemblages de diverses pratiques agricoles, etc.). C'est également dans cette optique qu'une démarche d'optimisation prend tout son sens, puisqu'elle permet de trouver différents compromis entre diverses configurations du paysage.

ANNEXES

Annexe 1 – Classification et évaluation statistique de a) 104 cépages pour leur date de véraison et b) 95 cépage pour la date de floraison

Source : Parker et al., 2013

*F** est la somme des degrés jours au-dessus de 0°C, à partir du 60^e jour de l'année. *EF* est l'efficacité du modèle. *RMSE* est l'erreur quadratique moyenne en jours.

a)					
Variety	Number of sites	Number of observations	F*	RMSE	EF
Meunier	1	4	1120	2.4	0.48
Poulsard	1	5	1122	0.8	0.93
Jacquère	1	3	1151	2.2	0.72
Savagnin	1	3	1155	1.6	0.69
Elbling	1	6	1155	3.1	0.74
Pinot gris	2	14	1171	3.9	0.91
Altesse	1	3	1172	2.9	0.38
Garanoir	1	9	1179	2.8	0.72
Trousseau	1	3	1179	1.3	0.74
Pinot noir Mariafield	1	9	1183	3.1	0.57
Tempranillo	1	5	1188	2.5	0.59
Gamaret	1	9	1189	2.8	0.68
Orbois	1	6	1192	3.0	-0.02
Aghiorgitiko	3	6	1193	4.2	0.63
Carmenère	1	2	1194	2.1	0.66
Enfariné noir	1	5	1195	4.4	0.48
Muscat à petits grains blancs	1	6	1200	3.5	0.53
Rivairenc	1	2	1201	0.3	0.70
Muscat de Hambourg	6	10	1207	3.5	0.34
Éillade noire	1	3	1209	2.6	-0.21
Nebbiolo	1	8	1211	2.0	0.70
Pinot noir Cortailod	1	9	1213	3.3	0.43
Chardonnay	21	170	1217	4.9	0.76
Roussanne	1	4	1217	3.5	0.03
Mondeuse noire	1	6	1219	3.9	0.46
Gamay	11	109	1219	5.0	0.63
Pinot noir	12	151	1219	5.1	0.77
Piquepoul blanc	1	2	1222	1.6	-1.69
Aligoté	2	9	1227	3.1	0.92
Pinot blanc	1	9	1228	3.2	0.54
Gewürztraminer	4	26	1230	5.3	0.89
Viognier	2	7	1232	4.3	0.49
Tressot noir	1	5	1236	3.0	-0.09
Fer	1	2	1236	1.4	0.13
Diolinoir	1	9	1236	3.1	0.67
Charmont	1	9	1238	2.7	0.73
Petit Verdot	3	18	1243	4.6	0.34
Cabernet franc	20	102	1245	5.1	0.72
Mancin	1	2	1246	1.0	-2.59
Riesling	5	56	1249	5.9	0.77
Kerner	1	9	1251	3.1	0.61
Piquepoul noir	1	6	1255	3.7	0.55
Xynomavro	1	4	1255	3.7	0.53
Zweigelt blau	1	7	1256	5.9	0.46
Terret gris	1	6	1258	2.5	0.68
Sylvaner	1	9	1258	2.7	0.69
Colombard	4	22	1258	2.6	0.65
Grolleau	1	18	1260	4.3	0.66
Brun Fourca	1	3	1262	2.4	0.47
Terret blanc	1	7	1263	2.3	0.72
Cornalin	1	8	1263	2.0	0.71
Portugais bleu	1	8	1265	4.5	0.71
Cinsaut	3	13	1265	2.8	0.27
Bourboulenc	1	4	1266	3.9	0.57
Grenache blanc	1	2	1267	0.7	0.52
Portan	2	12	1268	3.7	0.77
Merlot	14	107	1269	5.6	0.79
Vermentino	1	2	1270	0.6	0.95
Clairette	1	9	1271	3.7	0.63
Calitor	1	2	1271	1.1	-3.41
Colombaudo	1	4	1276	2.7	0.56
Chasselas	4	68	1276	6.2	0.81
Räuschling	1	9	1277	2.9	0.66
Grenache	35	127	1277	6.0	0.78
Humagne rouge	1	9	1278	2.3	0.77
Arvine	1	9	1278	3.3	0.63
Bondola	1	9	1278	2.4	0.73
Syrah	26	126	1279	4.8	0.84
Chenin	4	29	1280	4.8	0.73
Sauvignon	9	102	1282	5.1	0.82
Humagne blanc	1	9	1286	2.9	0.62
Sangiovese	4	49	1287	4.8	0.65
Carignan	6	44	1288	4.8	0.87
Doral	1	8	1296	2.7	0.44
Amigne	1	9	1297	2.8	0.65

Variety	Number of sites	Number of observations	F*	RMSE	EF
Cabernet-Sauvignon	11	131	1299	5.2	0.77
Cot	4	31	1306	4.4	0.74
Ségalin	1	6	1308	3.6	0.60
Chenanson	1	7	1309	3.1	0.68
Terret noir	1	3	1316	1.1	0.80
Semillon	3	26	1317	4.1	0.85
Marselan	2	11	1338	3.3	0.79
Marsanne	2	12	1338	4.5	0.89
Muscat d'Alexandrie	2	15	1343	6.3	0.87
Mourvèdre	25	93	1354	4.3	0.63
Egiodola	1	7	1354	1.7	0.82
Tannat	2	8	1363	3.8	0.79
Kadarka	1	8	1368	5.0	0.65
Ugni blanc	6	95	1376	5.0	0.79
Ariarnoa	2	15	1377	7.1	0.28
Ekigaina	1	7	1378	2.9	0.67
Muscadelle	1	16	1379	4.6	0.45
Pinotage	1	4	1387	4.0	0.62
Caladoc	2	8	1390	3.8	0.72
Semebat	1	7	1411	2.9	0.68

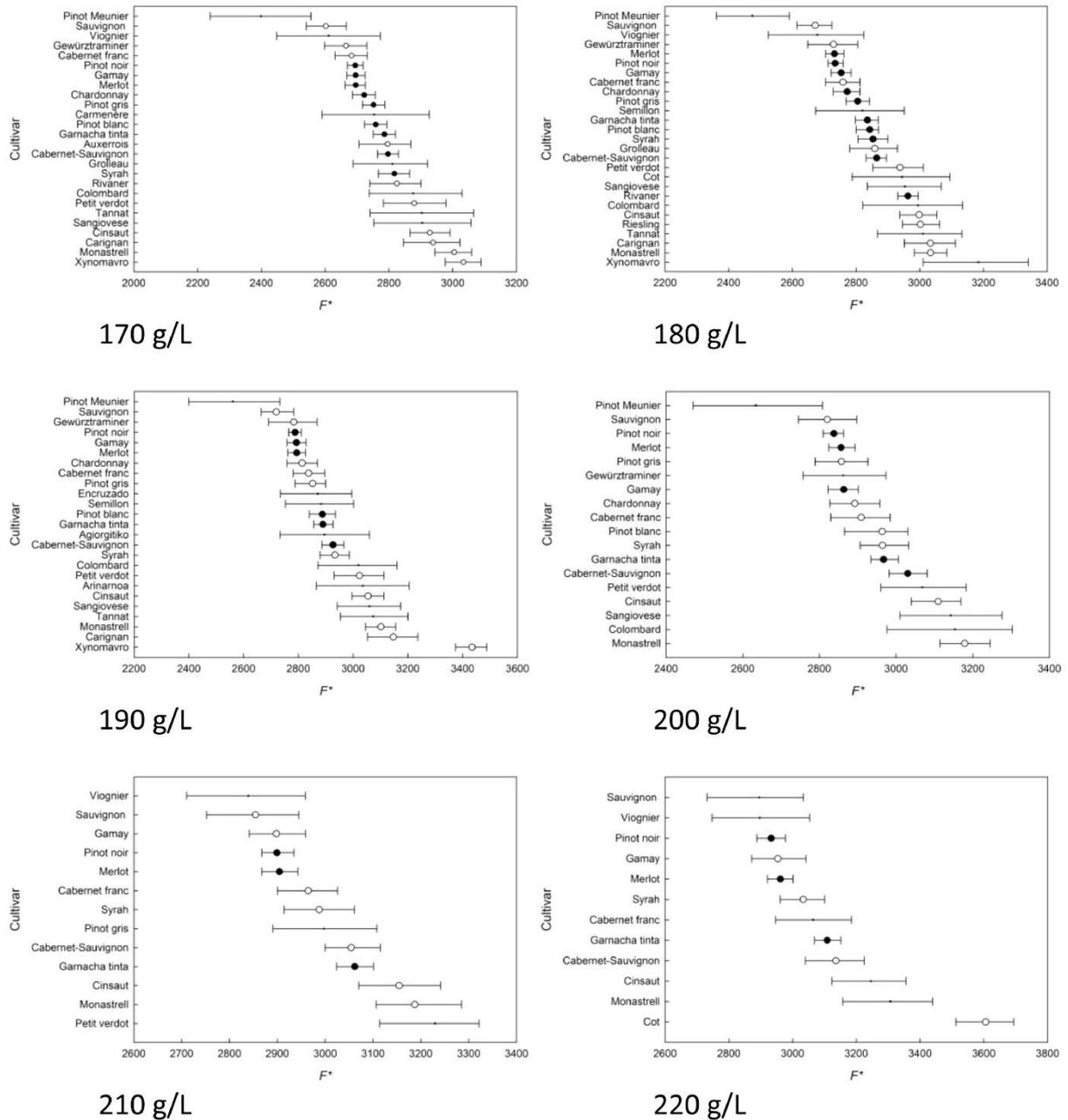
b)

Variety	Number of sites	Number of observations	F*	RMSE	EF
Garanoir	1	9	2286	3.9	0.44
Verdelho	1	3	2337	3.3	0.69
Charmont	1	9	2363	4.6	0.21
Chasselas	4	72	2374	6.2	0.87
Meunier	1	11	2379	3.8	0.65
Gamaret	1	9	2406	3.6	0.32
Elbling	1	8	2420	4.4	0.73
Doral	1	8	2437	3.6	0.12
Poulsard	1	7	2441	3.2	0.27
Savagnin	1	6	2443	2.9	0.79
Pinot noir Mariafield	1	9	2450	4.9	0.07
Portugais bleu	1	7	2461	3.1	0.86
Pinot noir Cortailod	1	9	2466	4.8	-0.06
Pinot gris	2	15	2472	4.7	0.89
Diolinoir	1	9	2476	4.3	-0.29
Tempranillo	1	11	2484	5.2	0.40
Orbois	1	11	2487	4.2	0.47
Sylvaner	1	9	2489	3.0	0.49
Gouais blanc	1	7	2493	3.9	0.71
Pinot blanc	2	12	2500	4.5	0.89
Aligoté	2	13	2502	4.2	0.85
Trousseau	1	10	2506	3.1	0.72
Gewurztraminer	4	28	2510	6.4	0.87
Pinot noir	7	80	2511	7.8	0.75
Muscat à petits grains blancs	2	15	2520	3.9	0.92
Kerner	1	9	2526	3.2	0.23
Sauvignon	9	73	2528	5.6	0.85
Gamay	8	75	2533	5.3	0.68
Portan	2	10	2537	5.7	0.79
Semillon	3	27	2537	4.1	0.87
Räuschling	1	8	2539	3.1	0.57
Chardonnay	17	105	2547	6.5	0.82
Muscadelle	1	15	2553	5.0	0.02
Bondola	1	9	2554	4.3	0.26
Zweigelt blau	1	6	2568	4.4	0.61
Jacquère	1	7	2569	4.6	0.57
Tressot noir	1	9	2584	4.1	0.67
Riesling	6	54	2590	6.8	0.78
Colombard	6	27	2591	3.5	0.75
Enfariné noir	1	7	2596	3.6	-0.02
Vioignier	3	18	2600	5.9	0.51
Syrah	23	103	2601	5.6	0.89
Carmenère	1	4	2605	2.7	0.64
Altesse	1	9	2615	6.4	0.55
Grenache blanc	2	4	2626	1.3	0.94
Egiodola	2	10	2627	6.9	0.67
Humagne blanc	1	9	2627	3.8	0.48
Amigne	1	9	2629	3.7	0.56
Merlot	17	162	2636	6.6	0.73
Marselan	4	16	2641	5.2	0.79
Brun Fourca	1	4	2642	3.8	0.33
Éillade noire	1	4	2645	2.0	0.84
Grolleau	1	17	2650	4.3	0.71
Ruby Cabernet	3	10	2654	4.9	0.07
Cot	2	13	2658	6.0	0.60
Pardotte	1	4	2660	1.6	0.95
Gros Cabernet	1	3	2664	1.9	0.84
Ségalin	1	6	2670	2.4	0.84
Barbera	1	4	2675	3.0	-3.04
Marsanne	3	19	2676	4.0	0.93
Cinsaut	4	17	2680	5.4	0.09
Kardarka	1	7	2682	5.7	0.69
Muscat de Hambourg	3	7	2685	5.9	-1.89
Fer	1	6	2689	5.1	0.28
Cabernet-Sauvignon	15	178	2689	6.9	0.64
Arvine	1	9	2692	3.8	0.27
Bourboulenc	1	9	2692	9.4	0.00
Cabernet franc	20	87	2692	7.1	0.63
Rivairenc	1	4	2695	2.2	0.81
Mourvèdre	6	22	2706	4.9	0.88
Cornalin	1	8	2707	5.4	0.43
Chenin	1	6	2712	8.1	-1.56
Mondeuse noire	1	5	2713	4.0	0.36
Chenanson	1	6	2721	2.3	0.87
Sangiovese	6	72	2729	7.3	0.20

Variety	Number of sites	Number of observations	F*	RMSE	EF
Nebbiolo	2	11	2734	4.2	0.89
Xynomavro	1	7	2736	7.2	-2.34
Calitor	1	3	2738	6.7	-1.65
Vermentino	3	23	2739	6.7	-0.12
Piquepoul noir	1	7	2739	5.0	0.42
Piquepoul blanc	2	6	2739	4.6	0.62
Terret noir	1	4	2741	2.9	0.52
Aghiorgitiko	3	6	2741	10.0	-1.17
Muscat d'Alexandrie	3	23	2742	7.6	0.89
Carignan	9	44	2749	6.3	0.89
Humagne rouge	1	9	2758	4.4	0.14
Clairette	1	13	2759	5.2	0.60
Grenache noir	34	110	2761	6.4	0.87
Roussanne	3	12	2774	3.4	0.77
Primitivo	1	7	2776	5.2	0.01
Pinotage	1	4	2780	4.4	0.72
Colombaud	1	4	2785	4.4	0.61
Ugni blanc	6	89	2799	7.8	0.74
Mancin	1	4	2800	3.2	0.60
Terret gris	1	9	2802	6.1	-0.07
Gros Manseng	1	3	2804	3.2	0.69
Sciaccarello	1	9	2831	3.2	0.35
Terret blanc	1	7	2838	5.6	0.07
Tannat	2	12	2840	5.0	0.54
Petit Verdot	5	26	2849	6.6	0.36
Caladoc	2	7	2867	9.8	0.59
Arinarnoa	4	18	2879	8.7	0.39
Ekigaina	1	6	2934	6.2	0.55
Semebat	1	6	2941	7.1	0.53

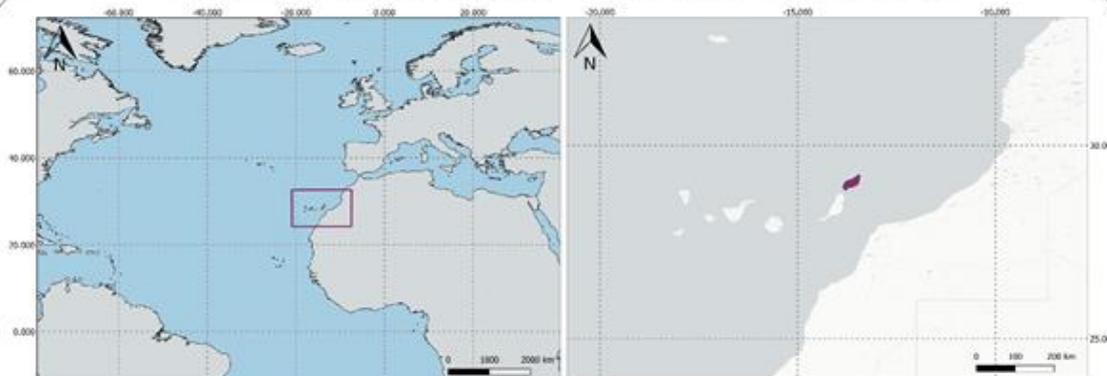
Annexe 2 – Classification et intervalles de confiance des cultivars pour le jour de l'année afin d'atteindre des concentrations en sucre de 170, 180, 190, 200, 210 et 220 g/l pour le modèle Grapevine Sugar Ripeness (GSR)

Source (Parker *et al.*, 2020a)



Annexe 3 - Exemple de typologie des vignobles littoraux et insulaires

DO LANZAROTE, ILES CANARIES, ESPAGNE



CARACTÉRISTIQUES CLIMATIQUES

Temp. annuelle moy.	20°C	Ppt moy. annuelles	150-200 mm
Temp. saisonnière moy.	21° C	Ppt moy. saison.	15 mm.
Amplitude therm. hebdo. annuelle moy.	6,5°C	Ensoleillement moy.	3000 h.
Amplitude therm. hebdo. saison. moy.	7°C	Vents	Du Sahara, chaud et sec

CARACTÉRISTIQUES DU VIGNOBLE

TOPOGRAPHIE		SOLS	
Altitude	100-500 m.	Composition	Volcanique
Pente	Peu de relief sur l'île	Profondeur	Cavité jusqu'à 3 mètres de profondeur
Distance à l'océan	Max. 6km		

CARACTÉRISTIQUES ECONOMIQUES

Superficie – 2016	1862 ha.	Marché visé	Local/tourisme
Production – 2016	4330 hl.	Appellations	DOP Lanzarote
Nb. de producteurs – 2016	1859		

MATERIEL VEGETAL ET MODE DE CONDUITE

CULTIVARS

Variétés	Malvasia, Listàn blanco, Verdello, Gual, Moscatel de Alejandria (<i>white</i>), Listàn Negro, Negramoll (<i>black</i>)		
Porte-greffes	Non	Maladie	No phylloxera

MODE DE CONDUITE

Implantation	Planté dans des cavités si la couche de lapili est fine ; des murs bas autour pour protéger des vents		
Système de conduite	Vignes basses		
Espacement	1,5 – 4 m.	Densité de plant	400-500 ceps/ha
Mécanisation	Impossible	Irrigation	Non irrigué

1995

DO Lanzarote

Canaries, Espagne



1849 ha ◦ 4330 hl ◦ 1797 vignerons

CLIMAT SOLS

Temp. moy. annuelle **21 °C**

200 mm annuels

3000 h ensoleillement

Peu de relief, sols **volcaniques**

Lapili en surface empêche la croissance des autres plantes, mais **thermo-régule** le sol et permet une **bonne rétention d'eau**

CEPAGES

Malvasia

Moscatel de Alejandria

Listàn Negro

Negramoll

Listàn blanco

Verdello

Gual

Les **entonnoirs** creusés pour la vigne permettent de **ne pas irriguer**, et de **lutter contre les vents** d'est, brûlants et desséchants. En complément, des **murets** de roche volcaniques pour protéger les ceps, et les vignes sont conduites **en treilles basses**. Les **ceps** sont très **espacés** (400-500 cep/ha), les parcelles vastes (1,9 ha en moy.), les **rendements très bas** et la **mécanisation n'est pas possible**. Les **vignes** sont **franches de pieds**, le phylloxera n'ayant jamais atteint les Canaries.

données 2016-2017 ; crédit photo : Google images



Annexe 5 - Classification des sols

Propriétés pédologiques - Description des champs			
Nom	Format	Description du champ	Source de description
N_UCS	Entier	Numéro de l'UCS à laquelle le polygone appartient	
MAT_DOM	Chaîne	Matériau parental dominant dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS). Il s'agit du matériau à partir duquel s'est formé le sol.	
P_MAT_DOM	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) du matériau parental dominant dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
MAT_2	Chaîne	Matériau parental secondaire dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS). Il s'agit du matériau à partir duquel s'est formé le sol.	
P_MAT_2	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) du matériau parental secondaire dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
DRAI_DOM	Chaîne	Classe de drainage dominante dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS). Il s'agit du drainage naturel de l'eau au sein du sol qui peut s'exprimer par la présence ou l'absence de signes d'oxydo-réduction. <ul style="list-style-type: none"> Code 1 : Drainage excessif (évacuation très rapide de l'eau dans le sol. Milieu très poreux) Code 2 : Drainage favorable (évacuation très rapide de l'eau dans le sol. Pas de phénomènes d'oxydoréduction) Code 3 : Drainage modéré (phénomènes d'oxydoréduction peu marqués. Horizon de pseudogley apparaissant en dessous de 80 cm) Code 4 : Drainage imparfait (phénomènes d'oxydoréduction modérément marqués. Horizon de pseudogley apparaissant entre 40 et 80 cm) Code 5 : Drainage faible (phénomènes d'oxydoréduction nettement marqués ; l'aspect est bariolé. Horizon de pseudogley apparaissant à moins de 40 cm et pouvant même atteindre la surface) Code 6 : Drainage assez pauvre (phénomènes d'oxydoréduction nettement marqués dès la surface et/ou un horizon de gley apparaît en dessous de 80 cm) Code 7 : Drainage pauvre (phénomènes d'oxydoréduction très fortement marqués dès la surface et/ou un horizon de gley apparaît entre 40 et 80 cm) Code 8 : Drainage très pauvre (phénomènes d'oxydoréduction très fortement marqués dès la surface et/ou un horizon de gley apparaît à moins de 40 cm) Code 9 : Submergé (l'eau se situe à la surface du sol ou au-dessus durant de longues périodes) 	InfoSol, 2012. - DoneSol version 3 : Dictionnaire de données. INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, 454 pages. http://www.ojssol.fr/outil/donesol/donesol.php
P_DRAI_DOM	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) de la classe de drainage dominant dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
DRAI_2	Chaîne	Classe de drainage secondaire dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS). Il s'agit du drainage naturel de l'eau au sein du sol qui peut s'exprimer par la présence ou l'absence de signes d'oxydo-réduction. <ul style="list-style-type: none"> Code 1 : Drainage excessif (évacuation très rapide de l'eau dans le sol. Milieu très poreux) Code 2 : Drainage favorable (évacuation très rapide de l'eau dans le sol. Pas de phénomènes d'oxydoréduction) Code 3 : Drainage modéré (phénomènes d'oxydoréduction peu marqués. Horizon de pseudogley apparaissant en dessous de 80 cm) Code 4 : Drainage imparfait (phénomènes d'oxydoréduction modérément marqués. Horizon de pseudogley apparaissant entre 40 et 80 cm) Code 5 : Drainage faible (phénomènes d'oxydoréduction nettement marqués ; l'aspect est bariolé. Horizon de pseudogley apparaissant à moins de 40 cm et pouvant même atteindre la surface) Code 6 : Drainage assez pauvre (phénomènes d'oxydoréduction nettement marqués dès la surface et/ou un horizon de gley apparaît en dessous de 80 cm) Code 7 : Drainage pauvre (phénomènes d'oxydoréduction très fortement marqués dès la surface et/ou un horizon de gley apparaît entre 40 et 80 cm) Code 8 : Drainage très pauvre (phénomènes d'oxydoréduction très fortement marqués dès la surface et/ou un horizon de gley apparaît à moins de 40 cm) Code 9 : Submergé (l'eau se situe à la surface du sol ou au-dessus durant de longues périodes) 	InfoSol, 2012. - DoneSol version 3 : Dictionnaire de données. INRA, US 1106 InfoSol, Orléans, 454 pages. http://www.ojssol.fr/outil/donesol/donesol.php
P_DRAI_2	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) de la classe de drainage secondaire dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
TEXT_DOM	Chaîne	Classe de texture suivant le triangle du GEPPA dominante dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
P_TEXT_DOM	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) de la classe dominante de texture dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
TEXT_2	Chaîne	Classe de texture suivant le triangle du GEPPA secondaire dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
P_TEXT_2	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) de la classe dominante de texture dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
SUPERFICIE	Entier	Superficie du polygone en ha	
FSOL_DOM	Chaîne	Famille de sols dominante dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS) Les familles de sols sont issues d'un regroupement des 321 Unités Typologiques de Sols (UTS) de la base de données IGCS (Inventaire Gestion Conservation des Sols) à l'échelle du 1/250000ème (Programme Sols de Bretagne, 2005-2010). Les familles de sols sont les suivantes : <ul style="list-style-type: none"> Sols brunifiés Sols de bord de côte Sols de talweg, de fond de vallée et sols tourbeux Sols des terrasses alluviales et sols des climats anciens Sols forestiers Sols peu épais non différenciés Sols podzolisés Sols présentant un lessivage d'argile 	
P_FSOL_DOM	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) de la famille de sol dominante dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
FSOL_2	Chaîne	Famille de sols secondaire dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS) Les familles de sols sont issues d'un regroupement des 321 Unités Typologiques de Sols (UTS) de la base de données IGCS (Inventaire Gestion Conservation des Sols) à l'échelle du 1/250000ème (Programme Sols de Bretagne, 2005-2010). Les familles de sols sont les suivantes : <ul style="list-style-type: none"> Sols brunifiés Sols de bord de côte Sols de talweg, de fond de vallée et sols tourbeux Sols des terrasses alluviales et sols des climats anciens Sols forestiers Sols peu épais non différenciés Sols podzolisés 	

P_FSOL_2	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) de la famille de sol secondaire dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
EPAIS_DOM	Chaîne	<p>Classe d'épaisseur de sol dominante dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS) suivant la codification de la méthode tarière du Massif armoricain (Rivière et al., 1992). Cette thématique a été réalisée en utilisant les tables STRATES. Les strates C,M,D,R ont été exclues des requêtes. Seules les strates "meubles" ont été prises en compte pour le calcul de cumul des épaisseurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Code 1 : Epaisseur de plus d'1 m • Code 2 : Epaisseur de 80 cm à 1 m • Code 3 : Epaisseur de 60 cm à 80 cm • Code 4 : Epaisseur de 40 cm à 60 cm • Code 5 : Epaisseur de 20 cm à 40 cm • Code 6 : Epaisseur de 0 cm à 20 cm 	<p>Rivière J.-M., S. Tico, et C. Dupont, 1992 - Méthode tarière Massif armoricain - Caractérisation des sols. 24 pages. http://www.sols-de-bretagne.fr/a-télécharger/CARACTERISATION-DES-SOLS</p>
P_EPAISDOM	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) de la classe d'épaisseur dominante dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	
EPAIS_2	Chaîne	<p>Classe d'épaisseur de sol secondaire dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS) suivant la codification de la méthode tarière du Massif armoricain (Rivière et al., 1992). Cette thématique a été réalisée en utilisant les tables STRATES. Les strates C,M,D,R ont été exclues des requêtes. Seules les strates "meubles" ont été prises en compte pour le calcul de cumul des épaisseurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Code 1 : Epaisseur de plus d'1 m • Code 2 : Epaisseur de 80 cm à 1 m • Code 3 : Epaisseur de 60 cm à 80 cm • Code 4 : Epaisseur de 40 cm à 60 cm • Code 5 : Epaisseur de 20 cm à 40 cm • Code 6 : Epaisseur de 0 cm à 20 cm 	<p>Rivière J.-M., S. Tico, et C. Dupont, 1992 - Méthode tarière Massif armoricain - Caractérisation des sols. 24 pages. http://www.sols-de-bretagne.fr/a-télécharger/CARACTERISATION-DES-SOLS</p>
P_EPAIS2	Entier	Etendue exprimée en pourcentage (%) de la classe d'épaisseur secondaire dans l'Unité Cartographique de Sol (UCS)	

BIBLIOGRAPHIE

- AbdelAziz, A. M., Alarabi, L., Basalamah, S. et Hendawi, A. (2021). A Multi-Objective Optimization Method for Hospital Admission Problem—A Case Study on Covid-19 Patients. *Algorithms*, 14(2), 1-14. <https://doi.org/10.3390/a14020038>
- Abdellaoui, M. et Gonzales, C. (2006). Théorie de l'Utilité Multi-attributs. Dans *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision* (Hermès, vol. 3, p. 25-62).
- ADVICLIM. (2015). *Observations à haute résolution des scénarios d'adaptation et d'atténuation pour la viticulture*.
- ADVICLIM. (2017). *Adapting viticulture to climate change, guidance manual to support winegrowers' decision-making*.
- Aigrain, P., Bois, B., Brugiere, F., Duchene, E., Cortazar-Atauri, I. G. de, Gautier, J., Giraud-Heraud, E., Hammond, R., Hannin, H., Ollat, N. et Touzard, J. M. (2019). L'utilisation par la viticulture française d'un exercice de prospective pour l'élaboration d'une stratégie d'adaptation au changement climatique. Dans *BIO Web of Conferences* (vol. 12, p. 03020). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191203020>
- Alcaraz, F. (2001). L'utilisation publicitaire des paysages de terrasses. *Études rurales*, 1-2(157-158), 195-210. <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.36>
- Amato, V. et Valletta, M. (2017). Wine Landscapes of Italy. Dans *Landscapes and Landforms of Italy* (Springer, p. 523-537). https://doi.org/10.1007/978-3-319-26194-2_45
- Amin, S. H. et Zhang, G. (2014). Closed-loop supply chain network configuration by a multi-objective mathematical model. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 6(1), 1-15. <https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2014.058890>
- Amiot, L. (2021). *DIAGNOSTIC CLIMATIQUE TERRITORIAL FOCUS « RESSOURCE EN EAU »*.
- Amiot, L., Dubreuil, V., Launay, J., Massa, F., Keromnes, E., Bardon, E. et Baraer, F. (2022). Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bretagne : les résultats du programme DEMOCLIM. Dans *35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie* (p. 6).
- Ashenfelter, O. et Storchmann, K. (2016). Climate Change and Wine: A Review of the Economic Implications. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 105-138. <https://doi.org/10.1017/jwe.2016.5>
- Ausseil, A.-G. E., Law, R. M., Parker, A. K., Teixeira, E. I. et Sood, A. (2021). Projected Wine Grape Cultivar Shifts Due to Climate Change in New Zealand. *Frontiers in Plant Science*, 12(618039). <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.618039>
- Avila, S. L. (2006). *Optimisation multiobjectif et analyse de sensibilité appliquées à la conception de dispositifs* [These de doctorat, Ecully, Ecole centrale de Lyon]. <https://www.theses.fr/2006ECDL0005>
- A.WidiP, C., Herry Utomo, W. et Sri, J. (2013). Identification of Spatial Patterns of Food Insecurity Regions using Moran's. Case Study: Boyolali Regency. *International Journal of Computer Applications*, 72(2), 54-62. <https://doi.org/10.5120/12470-8862>

- Azevedo, E. (2014). Climate overview. Dans *PICO ISLAND NATURAL HISTORY HANDBOOK* (p. 16-28). Governo dos Açores - Observatório Vulcanológico e Geotérmico dos Açores.
- Bachelier, J. (2020). Vins et vignobles en Bretagne au Moyen Âge. *Norois. Environnement, aménagement, société*, (254), 21-36. <https://doi.org/10.4000/norois.9578>
- Baggiolini, M. (1952). Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Revue romande d'agriculture et de viticulture*, 8(1), 4-6.
- Barbeau, G., Neethling, E., Ollat, N., Quénot, H. et Touzard, J. (2015). Adaptation au changement climatique en agronomie viticole. *Agronomie environnement & sociétés*, 5(1), 67-75.
- Barker, J. P. H. (2004). *Different worlds: law and the changing geographies of wine in France and New Zealand* [Thesis, ResearchSpace@Auckland]. <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/1226>
- Baudoui, V. (2012). *Optimisation robuste multiobjectifs par modèles de substitution* [phdthesis, ISAE - Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00742023>
- Bavaresco, L., Pecile, M. et Zavaglia, C. (2014). Evolution de la plate-forme ampélographique italienne. *Territoires du vin*, (6). <http://preo.u-bourgogne.fr/territoiresduvin/index.php?id=815>
- Belias, D., Velissariou, E., Rossidis, I., Papailias, S. et Mantas, C. (2018). AN EMPIRICAL INVESTIGATION OF THE TOURISTS VIEW ON HOW WINE TOURISM CAN IMPROVE IN GREECE (p. 548-553). 2nd International Scientific Conferenc.
- Beltrando, G. et Briche, E. (2010). Changement climatique et viticulture en Champagne : du constat actuel aux prévisions du modèle ARPEGE-Climat sur l'évolution des températures pour le XXIe siècle. *EchoGéo*, (14), 1-17. <https://doi.org/10.4000/echogeo.12216>
- Beltrando, G., Dahech, S. et Madelin, M. (2008). L'intérêt de l'étude des brises thermiques : exemples des brises littorales et orographiques. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 49-61.
- Benyoucef, L. et Xie, X. (2011). Supply Chain Design Using Simulation-Based NSGA-II Approach. Dans L. Wang, A. H. C. Ng et K. Deb (dir.), *Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing* (Springer, p. 455-491). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-652-8_17
- Berro, A. (2005). *Optimisation multiobjectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique* [Thèse de doctorat en informatique, Université Toulouse I].
- Berro, A. (2008). *Algorithme évolutionnaire pour l'optimisation multiobjectif* [Séminaire - Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes]. Toulouse, France.
- Bhanot, G. (1988). The Metropolis algorithm. *Reports on Progress in Physics*, 51(3), 429. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/51/3/003>
- Binard, M. (2000). Les spatiocartes d'occupation du sol. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 38(2000/1). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/5751>
- BIVB. (2018). *Les moyens de lutte contre le gel*.
- Boé, J., Terray, L., Habets, F. et Martin, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1643-1655. <https://doi.org/10.1002/joc.1602>

- Bois, B. et Pérard, J. (2009). Climat et viticulture au Vietnam : évaluation et perspectives. *Climatologie*, 6, 75-89. <https://doi.org/10.4267/climatologie.525>
- Boissinot, P. (2001). Archéologie des vignobles antiques du sud de la Gaule. *Gallia - Archéologie de la France antique*, 58, 45-68. <https://www.jstor.org/stable/43608337>
- Bonnardot, V., Carey, V. A., Madelin, M., Cautenet, S., Coetzee, Z. et Quénot, H. (2012). Spatial variability of night temperatures at a fine scale over the Stellenbosch wine district, SOUTH AFRICA. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 46. <https://doi.org/10.20870/oenone.2012.46.1.1504>
- Bonnardot, V., Carey, V. A., Planchon, O. et Cautenet, S. (2001). Sea breeze mechanism and observations of its effects in the Stellenbosch wine producing area. *Wynboer, 10-14*, 107-113. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00319262>
- Bonnardot, V. et Cautenet, S. (2009). Mesoscale Atmospheric Modeling Using a High Horizontal Grid Resolution over a Complex Coastal Terrain and a Wine Region of South Africa. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(2), 330-348. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1710.1>
- Bonnardot, V., Planchon, O., Carey, V. A. et Cautenet, S. (2002). Diurnal wind, relative humidity and temperature variation in the Stellenbosch-Groot Drakenstein winegrowing area. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 23(2), 62-72. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01107634>
- Bonnardot, V., Planchon, O. et Cautenet, S. (2005). Sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South-Western Cape and implications for the Stellenbosch wine-producing area. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3), 203-218. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0087-y>
- Bonnardot, V. et Quénot, H. (2020). Viticulture en Bretagne : challenge ou opportunité ? Quelques indices bioclimatiques régionaux. Dans *Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie* (p. 127-132). <https://doi.org/10/document>
- Bonnardot, V., Sturman, A., Soltanzadeh, I., Zawar-Reza, P., Hunter, J. J. et Quénot, H. (2011). Investigation of grapevine areas under climatic stress using high-resolution atmospheric modelling: case studies in South Africa and New Zealand. Dans *19th International Congress of Biometeorology* (p. 6).
- Bonnardot, V., Thibault, J., Petitjean, T. et Tissot, C. (2022). La vigne en Bretagne sous observation climatique. Dans *35ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Météo-France et Université Toulouse III.
- Bonnefoy, C. (2013). *Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique*, 322.
- Bonnefoy, C., Quénot, H., Barbeau, G. et Madelin, M. (2009). Analyse Multi scalaire des températures dans le vignoble du Val de Loire. *Géographica Technica*, 85-90.
- Bonnefoy, C., Quénot, H., Bonnardot, V., Barbeau, G., Madelin, M., Planchon, O. et Neethling, E. (2013). Temporal and spatial analyses of temperature in a French wine-producing area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*, 33(8), 1849-1862. <https://doi.org/10.1002/joc.3552>
- Bonnefoy, C., Quénot, H., Planchon, O. et Barbeau, G. (2010). Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo*, (14). <https://doi.org/10.4000/echogeo.12146>

- Boumedyen, T. (2017). La méthode PROMETHEE comme outil d'aide à la décision multicritère. *Revue Algérienne d'Economie et de Management*, 09, 1-11.
- Bousquet, A., Couderchet, L., Gassiat, A. et Hautdidier, B. (2013). Les résolutions des bases de données « occupation du sol » et la mesure du changement. Articuler l'espace, le temps et le thème. *L'Espace géographique*, 42(1), 61-76. <https://doi.org/10.3917/eg.421.0061>
- Braconnot, P., Boucher, O. et Salas y Mélia, D. (2019, 17 septembre). *Changement climatique : les résultats des nouvelles simulations françaises* [Conférence de presse]. Paris.
- Bramley, R. g. v., Ouzman, J., Trought, M. c. t., Neal, S. m. et Bennett, J. s. (2019). Spatio-temporal variability in vine vigour and yield in a Marlborough Sauvignon Blanc vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 25(4), 430-438. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12408>
- Bramley, R. g. v., Trought, M. c. t. et Praat, J.-P. (2011). Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: characterising variation in vineyard performance and options for the implementation of Precision Viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(1), 72-78. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00119.x>
- Brans, J.-P. et De Smet, Y. (2016). PROMETHEE Methods. Dans S. Greco, M. Ehrgott et J. R. Figueira (dir.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (p. 187-219). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_6
- Buonincontri, M., Allevato, E., Monaco, A., Migliozi, A. et Di Pasquale, G. (2017). Vineyards: A cultural landscape on the Island of Ischia, Italy. Dans *Island landscapes, an expression of European Culture* (p. 65-72). Routledge. <https://doi.org/10.4324/978131559011-0>
- Burns, S. (2012). The Importance of Soil and Geology in Tasting Terroir with a Case History from the Willamette Valley, Oregon. Dans P. H. Dougherty (dir.), *The Geography of Wine: Regions, Terroir and Techniques* (p. 95-108). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0464-0_6
- Cantat, O., Planchon, O., Quénot, H., Savouret, E., Bois, B., Beauvais, F. et Brunel-Muguet, S. (2019). Gelées tardives et viticulture en basse et moyenne Vallée de la Loire (France): Approche géoclimatique d'un aléa météorologique majeur pour la vigne. *Climatologie*, 16, 91-128. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1413>
- Carbonneau, A. (1976). *Mise au point bibliographique sur la photosynthèse chez la vigne*, 10(3), 249-267. <https://oeno-one.eu/article/view/1631>
- Carbonneau, A. et Escudier, J.-L. (2022). *De l'oenologie à la viticulture*. Quae.
- Cardell, M. F., Amengual, A. et Romero, R. (2019). Future effects of climate change on the suitability of wine grape production across Europe. *Regional Environmental Change*, 19(8), 2299-2310. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01502-x>
- Carlsson, C. et Fullér, R. (1994). Interdependence in fuzzy multiple objective programming. *Fuzzy Sets and Systems*, 65(1), 19-29. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(94\)90244-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(94)90244-5)
- Carton, Y., Sorensen, C., Smith, J. et Smith, E. (2007). Une coopération exemplaire entre entomologistes français et américains pendant la crise du Phylloxera en France (1868–1895). *Annales de la Société entomologique de France (N.S.)*, 43(1), 103-125. <https://doi.org/10.1080/00379271.2007.10697500>

- Charmont, C., Valérie, B. et Capdevila, L. (2020). Changement climatique et viticulture en Bretagne: émergence ou renaissance d'un vignoble? Une analyse historique (p. 7). 33ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie.
- Chartoire, R. (2010). À la base de la démarche de l'économiste. La construction de modèles. *Idées économiques et sociales*, 162(4), 42-49. <https://doi.org/10.3917/idee.162.0042>
- Chatelain, C., Adam, S., Lecourtier, Y., Heutte, L., Oufella, Y. et Paquet, T. (2007). Optimisation multi-objectif pour la sélection de modèles SVM. *Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, 67-72.
- CIV-Corse. (2010a). Dossier de presse, vins de Corse.
- CIV-Corse. (2010b). Dossier économique, vins de Corse.
- Clout, H. (2013). An Overview of the Fluctuating Fortunes of Viticulture in England and Wales. *EchoGéo*, (23). <https://doi.org/10.4000/echogeo.13333>
- Coello, C. A. (2000a). An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques. *ACM Computing Surveys*, 32(2), 109-143. <https://doi.org/10.1145/358923.358929>
- Coello, C. A. (2006). Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(1), 28-36. <https://doi.org/10.1109/MCI.2006.1597059>
- Coello, C. A. C. (2000b). Handling preferences in evolutionary multiobjective optimization: a survey. Dans *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512)* (vol. 1, p. 30-37 vol.1). <https://doi.org/10.1109/CEC.2000.870272>
- Collette, Y. et Siarry, P. (2003). *Multiobjective Optimization. Principles and Case Studies*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08883-8>
- Conceição, M. A. F., de Souza, R. T. et Tonietto, J. (2016). Estimating MCC System Dryness Index using the Vineyard Water Indicator. *BIO Web of Conferences*, 7, 01037. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20160701037>
- Corne, D., Knowles, J. et Oates, M. (2000). The Pareto Envelop-based Selection Algorithm for Multi-Objective Optimization. Dans *Parallel Problem Solving from Nature* (vol. 1917, p. 839-848). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45356-3_82
- Corno, F., Reorda, M. S. et Squillero, G. (1998). VEGA: a verification tool based on genetic algorithms. Dans *Proceedings International Conference on Computer Design. VLSI in Computers and Processors (Cat. No.98CB36273)* (p. 321-326). <https://doi.org/10.1109/ICCD.1998.727069>
- Costa-Carrapiço, I., Raslan, R. et González, J. N. (2020). A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. *Energy and Buildings*, 210, 109690. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109690>
- Dahech, S., Berges, J.-C. et Beltrando, G. (2012). Localisation et dynamique du front de la brise de mer au Maghreb oriental. *Climatologie*, 9, 59-81. <https://doi.org/10.4267/climatologie.189>
- Dami, I. E., Ennahli, S. et Zhang, Y. (2012). Assessment of Winter Injury in Grape Cultivars and Pruning Strategies Following a Freezing Stress Event. *American Journal of Enology and Viticulture*, 63(1), 106-111. <https://doi.org/10.5344/ajev.2011.11040>
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. et Meyarivan, T. (2000). A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. Dans M. Schoenauer, K. Deb, G.

- Rudolph, X. Yao, E. Lutton, J. J. Merelo et H.-P. Schwefel (dir.), *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI* (p. 849-858). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45356-3_83
- Deloire, A., Ojeda, H., Zebic, O., Bernard, N., Hunter, J. J. et Carbonneau, A. (2006). INFLUENCE DE L'ETAT HYDRIQUE DE LA VIGNE SUR LE STYLE DE VIN. *Revue Française d'Oenologie*, 215, 11-15.
- de Rességuier, L., Laveau, C., Mary, S., Dejean, D. et Van Leeuwen, C. (2017). Temperature variability at local scale in a mountain vineyard. Dans *GiESCO International Meeting* (vol. 20, p. 5).
- de Rességuier, L., Mary, S., Le Roux, R., Petitjean, T., Quénot, H. et van Leeuwen, C. (2020). Temperature Variability at Local Scale in the Bordeaux Area. Relations With Environmental Factors and Impact on Vine Phenology. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.00515>
- Dhaenens, C. (2005). *Optimisation Combinatoire Multi-Objectif: Apport des méthodes coopératives et contribution à l'extraction de connaissances* [These de doctorat en informatique, Université des Sciences et Technologie de Lille].
- Dhillon, J. S. et Kothari, D. P. (2000). The surrogate worth trade-off approach for multiobjective thermal power dispatch problem. *Electric Power Systems Research*, 56(2), 103-110. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(00\)00092-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(00)00092-4)
- Doelman, J. C., Stehfest, E., Tabeau, A., van Meijl, H., Lassaletta, L., Gernaat, D. E. H. J., Hermans, K., Harmsen, M., Daioglou, V., Biemans, H., van der Sluis, S. et van Vuuren, D. P. (2018). Exploring SSP land-use dynamics using the IMAGE model: Regional and gridded scenarios of land-use change and land-based climate change mitigation. *Global Environmental Change*, 48, 119-135. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.014>
- Dolanzarote.com. (s. d.). Culture, Densité et distance de plantation.
- Domizio, P. et Lencioni, L. (2011). Vin Santo. Dans *Speciality Wines* (Academic Press, vol. 63, p. 41-100).
- Downey, M. O., Dokoozlian, N. K. et Krstic, M. P. (2006). Cultural Practice and Environmental Impacts on the Flavonoid Composition of Grapes and Wine: A Review of Recent Research. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57(3), 257-268. <https://doi.org/10.5344/ajev.2006.57.3.257>
- Dréo, J., Siarry, P., Pétrowski, A. et Taillard, E. (2006). *Metaheuristics for Hard Optimization* (Springer). Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-30966-7>
- Drumonde-Neves, J., Franco-Duarte, R., Lima, T., Schuller, D. et Pais, C. (2017). Association between Grape Yeast Communities and the Vineyard Ecosystems. *PLoS ONE*, 12(1), e0169883. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169883>
- Duchêne, E. et Schneider, C. (2005). Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, 25(1), 93-99. <https://doi.org/10.1051/agro:2004057>
- Dumas, V., Lebon, E. et Morlat, R. (1997). Differentiation of local climate in the Alsatian vineyard. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 31, 1-9. <https://doi.org/10.20870/oenone.1997.31.1.1090>
- Edeleva, O. et Stennikov, V. (2019). Multi-Criteria Optimization of the Heat Energy Sources Structure (p. 95-101). VIth International Workshop « Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security » (IWCI 2019), Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/iwci-19.2019.17>

- El Aou-ouad, H., Montero, R., Baraza, E. et Bota, J. (2022). Recovering Ancient Grapevine Cultivars in the Balearic Islands: Sanitary Status Evaluation and Virus Elimination. *Plants*, 11(13), 1754. <https://doi.org/10.3390/plants11131754>
- Etcheverria, O. (2015). Du vignoble à la destination œnotouristique. L'Exemple de l'île de Santorin. *Culture, Revista de Cultura e Turismo*, 8(3), 188-210.
- Figueira, J. R., Greco, S., Roy, B. et Słowiński, R. (2010). ELECTRE Methods: Main Features and Recent Developments. Dans C. Zopounidis et P. M. Pardalos (dir.), *Handbook of Multicriteria Analysis* (p. 51-89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92828-7_3
- Fonseca, C. M. et Fleming, P. J. (1993). Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. The fifth Intel conference on Genetic Algorithms.
- Fourment, M., Bonnardot, V., Ferrer, M. et Quénoł, H. (2014a). Température et circulation atmosphérique locale : observations dans le vignoble du sud de l'Uruguay. *Climatologie*, 11, 47-64.
- Fourment, M., Bonnardot, V., Planchon, O., Ferrer, M. et Quénoł, H. (2014b). Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier : observations dans le sud de l'Uruguay. *Climatologie*, 11, 47-64. <https://doi.org/10.4267/climatologie.589>
- Fourment, M., Ferrer, M., Gonzalez-Neves, G., Barbeau, G., Bonnardot, V. et Quénoł, H. (2017). Tannat grape composition responses to spatial variability of temperature in an Uruguay's coastal wine region. *International Journal of Biometeorology*, 61. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1340-2>
- Fraga, H., Atauri, I. G. de C., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J. et Santos, J. A. (2017). Viticulture in Portugal: A review of recent trends and climate change projections. *OENO One*, 51(2), 61-69. <https://doi.org/10.20870/oenone.2017.51.2.1621>
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Jones, G. V., Alves, F., Pinto, J. G. et Santos, J. A. (2014). Very high resolution bioclimatic zoning of Portuguese wine regions: present and future scenarios. *Regional Environmental Change*, 14(1), 295-306. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0490-y>
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J. et Santos, J. A. (2012a). An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security*, 1(2), 94-110. <https://doi.org/10.1002/fes3.14>
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J. et Santos, J. A. (2013). Future scenarios for viticultural zoning in Europe: ensemble projections and uncertainties. *International Journal of Biometeorology*, 57(6), 909-925. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0617-8>
- Fraga, H., Santos, J. A., Malheiro, A. C. et Moutinho-Pereira, J. (2012b). *Climate Change Projections for the Portuguese Viticulture Using a Multi-Model Ensemble*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5126.6647>
- FranceAgriMer. (2016a). *Analyse des filières vitivinicoles des principaux pays producteurs dans le monde*.
- FranceAgriMer. (2016b). *Analyse des filières vitivinicoles des principaux pays producteurs dans le monde. Fiche de synthèse d'Australie*.
- FranceAgriMer. (2016c). *Analyse des filières vitivinicoles des principaux pays producteurs dans le monde. Fiche de synthèse de Nouvelle Zélande*.

- FranceAgriMer. (2016d). *Une prospective pour le secteur vignes et vins dans le contexte du changement climatique*.
- Francisci, D. (2002). *Algorithmes Evolutionnaires et Optimisation Multi-objectifs en Data Mining* (I3S/RR-2002-12-FR) [Rapport de recherche]. Laboratoire Informatique, signaux et systèmes.
- Francisci, D. (2008). *Techniques d'optimisation pour la fouille de données* [These de doctorat en informatique, Université de Nice-Sophia Antipolis].
- Garcia de Cortazar-Atauri, I., ATAURI, C., BRISSON, N., SEGUIN, B., GAUDILLERE, J. et BACULAT, B. (2005). Simulation of budbreak date for vine. The BRIN model. Some applications in climate change study. Dans *Proceedings of the XIV International GESCO Viticulture Congress* (p. 485-490).
- García de Cortázar-Atauri, I., Brisson, N. et Gaudillere, J. P. (2009). Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *International Journal of Biometeorology*, 53(4), 317-326. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0217-4>
- Gavrilescu, C., Bois, B., Castel, T., Larmure, A., Ouvrié, M. et Richard, Y. (2019). Analyse spatiale de l'évolution du risque de gel sur la vigne en Bourgogne-Franche-Comté. Dans C. A. & P. M. K. Tolika (dir.), *32ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* (p. 181-186). Association Internationale de Climatologie. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02189405>
- Gendreau, M. et Potvin, J.-Y. (2014). Tabu Search. Dans E. K. Burke et G. Kendall (dir.), *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques* (p. 243-263). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6940-7_9
- Glize, E. (2019). *Méthodes exactes pour les problèmes combinatoires bi-objectif: Application sur les problèmes de tournées de véhicules* [Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse].
- Glover, F. et Laguna, M. (1999). *Tabu search*. *ORSA Journal on Computing* (Springer, vol. 1). <https://doi.org/10.1287/ijoc.1.3.190>
- Goldberg, D. E. et Richardson, J. (1987). Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. Dans *proceedings of the second International Conference on Genetic Algorithms*. Hillsdale, N.J. : L. Erlbaum Associates, 1987. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Genetic+algorithms+with+sharing+for+multimodal+function+optimization&author=Goldberg%2C+D.E.&publication_year=1987
- Guinoiseau, L. (2014). *Réimplantation de vignes dans le Golfe du Morbihan, étude d'opportunité pour le renouveau des pratiques vitivinicoles*.
- Haimes, Y. Y. et Hall, W. A. (1974). Multiobjectives in water resource systems analysis: The Surrogate Worth Trade Off Method. *Water Resources Research*, 10(4), 615-624. <https://doi.org/10.1029/WR010i004p00615>
- Hamon, B., Thibault, J., Tissot, C., Parker, A. et Quénot, H. (in prep.). Identification of suboptimal viticultural areas by spatial optimization : application in New Zealand, South Island in a context of climate change. *Australian Journal of Grape and Wine Research*.
- Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., Zhi, L., Marquet, P. A. et Hijmans, R. J. (2013). Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17), 6907-6912. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110>

- Helff, F., Gruenwald, L. et d’Orazio, L. (2016). Weighted Sum Model for Multi-Objective Query Optimization for Mobile-Cloud Database Environments. *EDBT/ICDT Workshops*, 1-6.
- Heras-Roger, J., Díaz-Romero, C. et Rios-Mesa, J. D.-M. and D. (2017). *Characterization of Red Wines from Macaronesia. Grapes and Wines - Advances in Production, Processing, Analysis and Valorization*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71795>
- Herrman, Th. M. et Planchon, O. (1998). Climat et aménagement littoral en poméranie occidentale (Allemagne/Mer baltique). Dans *Publications de l’Association Internationale de Climatologie* (vol. 11, p. 99-106).
- Hill, R. (2021). Antipode viticole ? Commerce global et terroirs d’invention en Nouvelle-Zélande. *Revue de géographie historique*, (19-20). <https://doi.org/10.4000/geohist.2337>
- Holden, N. (1995). Winemaking in Japan: Tradition and Determination. *International Journal of Wine Marketing*, 7(1), 23-31. <https://doi.org/10.1108/eb008638>
- Horn, J., Nafpliotis, N. et Goldberg, D. E. (1994). A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. Dans *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence* (p. 82-87 vol.1). <https://doi.org/10.1109/ICEC.1994.350037>
- Hosny, H. E., Ibrahim, A. H. et Eldars, E. A. (2021). Development of an integrated sustainability optimization tool for infrastructure projects. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1), 113. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00701-y>
- Hubert-Moy, L., Thibault, J., Fabre, E., Rozo, C., Arvor, D., Corpetti, T. et Rapinel, S. (2019a). Mapping Grassland Frequency Using Decadal MODIS 250 m Time-Series: Towards a National Inventory of Semi-Natural Grasslands. *Remote Sensing*, 11(24), 3041. <https://doi.org/10.3390/rs11243041>
- Hubert-Moy, L., Thibault, J., Fabre, E., Rozo, C., Arvor, D., Corpetti, T. et Rapinel, S. (2019b). Time-series spectral dataset for croplands in France (2006–2017). *Data in Brief*, 27, 104810. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104810>
- Huetz de Lempis, A. (2002). Le renouveau du vignoble des îles Canaries. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 14(1), 19-25. https://www.persee.fr/doc/rgpso_1276-4930_2002_num_14_1_2803
- Huglin, P. (1986). *Biologie et écologie de la vigne* (Editions Payot Lausanne).
- IFV Sud-Ouest. (2012). *Vins et vignobles d’océanie*.
- Imre, S. P. et Mauk, J. L. (2009). Geology and Wine 12. New Zealand Terroir. *Geoscience Canada*, 36(4), 145-159.
- Ingrassia, M., Altamore, L., Columba, P., Bacarella, S. et Chironi, S. (2018). The communicative power of an extreme territory - the Italian island of Pantelleria and its Passito wine: a multidimensional-framework study. *International Journal of Wine Business Research*, 30, 00-00. <https://doi.org/10.1108/IJWBR-06-2017-0039>
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- IPCC. (2022a). Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, 37-118. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>

- IPCC. (2022b). Headline statements from the summary for policymakers. Working Group II. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, 3.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563-578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jahanshahloo, G. R., Mozaffari, M. R. et Sobhan, Z. (2012). The cost and income efficiency models with MOLP structure. *Iranian Journal of optimization*, 4(1), 304-311.
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M. et Wavresky, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155>
- Jones, G. et Hellman, E. (2003). Site Assessment. Dans *Hellman E.W* (Oregon viticulture, p. 44-50). Oregon State University Press.
- Jones, G. V. (2007). Climate Change: Observations, Projections, and General Implications for Viticulture and Wine Production. Dans *International Symposium Innovations in Enology* (p. 1-15).
- Jones, G. V. (2013). Winegrape Phenology. Dans M. D. Schwartz (dir.), *Phenology: An Integrative Environmental Science* (p. 563-584). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_30
- Jones, G. V. et Alves, F. (2011). Impacts of Climate Change on Wine Production: A Global Overview and Regional Assessment in the Douro Valley of Portugal. *International Journal of Global Warming*, 4(3/4), 383-406.
- Jones, G. V. et Davis, R. E. (2000). Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture*, 51(3), 249-261.
- Jones, G. V., Duchêne, E., Tomasi, D., Yuste, J., Braslavska, O., Schultz, H., Martinez, C., Boso, S., Langellier, F., Perruchot, C. et Guimberteau, G. (2005a). Changes in European winegrape phenology and relationships with climate. *XIV International GESCO Viticulture Congress, Geisenheim, Germany, 23-27 August, 2005*, 54-61. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20053213736>
- Jones, G. V., Edwards, E. J., Bonada, M., Sadras, V. O., Krstic, M. P. et Herderich, M. J. (2022). Climate change and its consequences for viticulture. Dans A. G. Reynolds (dir.), *Managing Wine Quality (Second Edition)* (p. 727-778). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102067-8.00015-4>
- Jones, G. V., Reid, R. et Vilks, A. (2012a). Climate, Grapes, and Wine: Structure and Suitability in a Variable and Changing Climate. Dans P. H. Dougherty (dir.), *The Geography of Wine* (p. 109-133). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0464-0_7
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R. et Storchmann, K. (2005b). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*, 73(3), 319-343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>
- Jones, G. et Webb, L. (2010). Climate Change, Viticulture, and Wine: Challenges and Opportunities. *Journal of Wine Research*, 21, 103-106. <https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530091>

- Jones, P. D., Lister, D. H., Osborn, T. J., Harpham, C., Salmon, M. et Morice, C. P. (2012b). Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D5). <https://doi.org/10.1029/2011JD017139>
- Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S. et Vautard, R. (2014). *Le climat de la France au XXIe siècle, Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer* (Volume 4) [Rapport Direction Générale de l'Energie et du Climat].
- Keller, M. (2010). Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16(s1), 56-69. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00077.x>
- Khare, V. (2002). *Performance scaling of multi-objective evolutionary algorithms* [report submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of MSc in Natural Computation]. School of Computer Science, Univeristy of Birmingham.
- Knowles, J. et Corne, D. (1999). The Pareto archived evolution strategy: a new baseline algorithm for Pareto multiobjective optimisation. Dans *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)* (vol. 1, p. 98-105 Vol. 1). <https://doi.org/10.1109/CEC.1999.781913>
- Koufos, G. C., Mavromatis, T., Koundouras, S. et Jones, G. V. (2018). Response of viticulture-related climatic indices and zoning to historical and future climate conditions in Greece. *International Journal of Climatology*, 38(4), 2097-2111. <https://doi.org/10.1002/joc.5320>
- Koufos, G., Mavromatis, T., Koundouras, S., Fyllas, N. M. et Jones, G. V. (2014). Viticulture–climate relationships in Greece: the impacts of recent climate trends on harvest date variation. *International Journal of Climatology*, 34(5), 1445-1459. <https://doi.org/10.1002/joc.3775>
- Laesslé, M. (2016). *Comment le Nouveau Monde fait-il pousser du vin? Les appellations du Marlborough et de Central Otago en Nouvelle-Zélande*. https://www.academia.edu/27062620/Comment_le_Nouveau_Monde_fait_il_pousser_du_vin_Les_appellations_du_Marlborough_et_de_Central_Otago_en_Nouvelle_Z%C3%A9lande
- Laguna, M. (2018). Tabu Search. Dans R. Martí, P. M. Pardalos et M. G. C. Resende (dir.), *Handbook of Heuristics* (Springer International Publishing, p. 741-758). https://doi.org/10.1007/978-3-319-07124-4_24
- Lasnier, J., Vincent, C. et De Coussergues, C.-H. (2016). Évolution de la viticulture québécoise depuis trente ans. *Phytoma*, (696), 37-40.
- Lasserre, F. (2001). L'essor du vignoble au Québec. Histoire de climats et de goûts. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.3747>
- Lasserre, F. (2017). *Impact des changements climatiques et des conditions géographiques locales sur la maturation des cépages hybrides et rustiques au Québec* [Rapport technique]. Laval, France.
- Lazcano, C., Decock, C. et Wilson, S. G. (2020). Defining and Managing for Healthy Vineyard Soils, Intersections With the Concept of Terroir. *Frontiers in Environmental Science*, 8(Art. 68), 1-17. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2020.00068>
- Le Bras, S. (2017). *Les petits vignobles. Des territoires en question* (Presse Universitaire de Rennes). <https://www.decitre.fr/livres/les-petits-vignobles-9782753553507.html>

- Le Roux, R. (2017). *Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique* [Thèse de doctorat en géographie, Université Rennes 2].
- Le Roux, R., Rességuier, L. D., Katurji, M., Zawar-Reza, P., Sturman, A., Leeuwen, C. V. et Quénol, H. (2017). Analyse multiscalaire de la variabilité spatiale et temporelle des températures à l'échelle des appellations viticoles de saint-émilion, pomerol et leurs satellites. *Climatologie*, 14, 1-17. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1243>
- Le Roux, R., van Leeuwen, C., Rességuier, L., Neethling, E., Liviu Mihai, I., Santesteban, L., Patriche, C., Manfred, S., Hofmann, M., Foss, C., Bonnardot, V., Quénol, H. et Planchon, O. (2018). Climate modeling at vineyards scale in a climate change context. Dans *XIIIth International Terroir Congress* (p. 1-4).
- Leeuwen, C. van, Bois, B., Cellié, N., Trégoat, O. et Roby, J. P. (2009). Les modifications de l'expression du terroir induites par le changement climatique nécessitent une adaptation du matériel végétal et des techniques viticoles. *Revue Française d'Oenologie*, (235), 10.
- Leeuwen, C. van et Destrac-Irvine, A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One*, 51(2), 147-154. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1647>
- Legouy, F. et Boulanger, S. (2015). *Atlas de la vigne et du vin : un nouveau défi de la mondialisation* (Armand Colin).
- Legros, P. J. P. (1993). L'Invasion du vignoble par le Phylloxéra. *Académie des Sciences et lettres de Montpellier, Conférence n°2102*(Bull. n°24), 205-222.
- Lepousez, V. et Aboukrat, M. (2022). *Les scénarios SSP : décryptage et recommandations d'utilisation pour une démarche d'adaptation au changement climatique* [Rapport technique].
- Loiseau, T., Richer-de-Forges, A. C., Roudier, P., Ducommun, C., Chen, S. et Lagacherie, P. (2020). Essais de représentation cartographique de l'incertitude pour les utilisateurs de cartographies des sols par modélisation statistique. *Etude et Gestion des Sols*, 27(1), 257-275.
- Loussert, P. (2017). *Caractérisation de la viticulture irriguée par télédétection en contexte de changement climatique: application aux vignobles de la province de Mendoza en Argentine* [Thèse de doctorat en géographie, Université Rennes 2].
- Mabed, M.-H., Rahoual, M., Talbi, E.-G. et Dhaenens, C. (2001). Algorithmes génétiques multicritères pour les problèmes de flowshop (p. 843-849). 3 e conférence Francophone de Modélisation et SIMulation « conception, Analyse et Gestion des systèmes industriels » MOSIM'0.
- Madelin, M., Bois, B. et Chabin, J.-P. (2010). Modification des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole liée au réchauffement climatique. *EchoGéo*, (14). <https://doi.org/10.4000/echogeo.12176>
- Madelin, M., Grasland, C., Mathian, H., Sanders, L. et Vincent, J.-M. (2009). Das „MAUP“: Modifiable Areal Unit – Problem oder Fortschritt? *Informationen zur Raumentwicklung*, 10(11), 645-661.
- Madrugá, J., Azevedo, E. B., Sampaio, J. F., Fernandes, F., Reis, F. et Pinheiro, J. (2015). Analysis and definition of potential new areas for viticulture in the Azores (Portugal). *SOIL*, 1(2), 515-526. <https://doi.org/10.5194/soil-1-515-2015>
- Makra, L., Vitányi, B., Gál, A., Mika, J., Matyasovszky, I. et Hirsch, T. (2009). Wine Quantity and Quality Variations in Relation to Climatic Factors in the Tokaj (Hungary) Winegrowing Region.

American Journal of Enology and Viticulture, 60(3), 312-321.
<https://doi.org/10.5344/ajev.2009.60.3.312>

- Makubikua, J. L., Wema, A., Mangongo, Y. T., Bukweli, J.-D. K. et Kampempe, J. D. B. (2023). A New Approach for Solving Fuzzy Linear Multi-Criterion Problems: An Approach Based on Minimization of the Errors Functions. *American Journal of Operations Research*, 13, 1-17.
- Malheiro, A., Santos, J., Fraga, H. et Pinto, J. (2010). Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate Research*, 43(3), 163-177. <https://doi.org/10.3354/cr00918>
- Mantia, T. L., Carimi, F., Lorenzo, R. D. et Pasta, S. (2011). The agricultural heritage of Lampedusa (Pelagie Archipelago, South Italy) and its key role for cultivar and wildlife conservation. *Italian Journal of Agronomy*, 6(2), e17-e17. <https://doi.org/10.4081/ija.2011.e17>
- Marre, A. (2004). Existe-t-il des terroirs viticoles en Champagne ? *Revue Géographique de l'Est*, 44(1-2), 17-30. <https://doi.org/10.4000/rge.994>
- Mårtensson, A., Karlsson, T. et Gustafsson, J. (2013). Swedish vineyards: a utopia? *International Journal of Wine Research*, 39. <https://doi.org/10.2147/IJWR.S44043>
- Martinet, L. (2021). L'irruption de la notion de communauté en droit international de la culture. *In Situ. Revue des patrimoines*, 44. <https://doi.org/10.4000/insitu.30738>
- Massoud, E. c., Espinoza, V., Guan, B. et Waliser, D. e. (2019). Global Climate Model Ensemble Approaches for Future Projections of Atmospheric Rivers. *Earth's Future*, 7(10), 1136-1151. <https://doi.org/10.1029/2019EF001249>
- Maystre, L. Y., Pictet, J. et Simos, J. (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. PPUR presses polytechniques.
- Merad, M. (2010). *Aide à la décision et expertise en gestion des risques* (Tec&Doc-Lavoisier).
- Morales, A. G. (2011). Le vin sur l'île de Lanzarote : culture et production. *Territoires du vin*, (3). <http://preo.u-bourgogne.fr/territoiresduvin/index.php?id=1420>
- Morales-Castilla, I., García de Cortázar-Atauri, I., Cook, B. I., Lacombe, T., Parker, A., van Leeuwen, C., Nicholas, K. A. et Wolkovich, E. M. (2020). Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(6), 2864-2869. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906731117>
- Morin, G. (2022). *Potentialité de la télédétection thermique pour la modélisation climatique en milieu viticole* [Thèse de doctorat en géographie, Université Rennes 2]. <https://www.theses.fr/2022REN20021>
- Morin, G., Le Roux, R., Lemasle, P.-G. et Quénot, H. (2021). Mapping Bioclimatic Indices by Downscaling MODIS Land Surface Temperature: Case Study of the Saint-Emilion Area. *Remote Sensing*, 13(1), 4. <https://doi.org/10.3390/rs13010004>
- Mosedale, J. R., Abernethy, K. E., Smart, R. E., Wilson, R. J. et Maclean, I. M. D. (2016). Climate change impacts and adaptive strategies: lessons from the grapevine. *Global Change Biology*, 22(11), 3814-3828. <https://doi.org/10.1111/gcb.13406>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. et Wilbanks, T. J. (2010).

- The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Nasrabadi, M. M., Nasrabadi, E. et Nasrabad, A. R. (2005). Fuzzy linear regression analysis: a multi-objective programming approach. *Applied Mathematics and Computation*, 163(1), 245-251. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2004.02.008>
- Naulleau, A., Gary, C., Prévot, L., Berteloot, V., Fabre, J.-C., Crevoisier, D., Gaudin, R. et Hossard, L. (2022). Participatory modeling to assess the impacts of climate change in a Mediterranean vineyard watershed. *Environmental Modelling & Software*, 150, 105342. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105342>
- Neethling, E. (2016). *Adaptation de la viticulture au changement climatique : vers des stratégies à haute résolution* [Thèse de doctorat en géographie, Université Rennes 2]. <https://www.theses.fr/2016REN20045>
- Neethling, E., Barbeau, G., Coulon-Leroy, C. et Quénot, H. (2019). Spatial complexity and temporal dynamics in viticulture: A review of climate-driven scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276-277, 107618. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107618>
- Neethling, E., Barbeau, G., Quenol, H. et Bonnefoy, C. (2011). Évolution du climat et de la composition des raisins des principaux cépages cultivés dans le Val de Loire. *Climatologie*, 8, 79-92. <https://doi.org/10.4267/climatologie.323>
- Neethling, É., Sicard, S., Barbeau, G., Bonnefoy, C. et Quénot, H. (2012). Spatial variability of temperature and grapevine growth at terroir scales in the context of climate change. Dans *Actes du IX Congrès International des Terroirs* (p. 48-50).
- Nesbitt, A., Dorling, S. et Lovett, A. (2018). A suitability model for viticulture in England and Wales: opportunities for investment, sector growth and increased climate resilience. *Journal of Land Use Science*, 13(4), 414-438. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2018.1537312>
- New Zealand Wine. (2022). *Vineyard report 2022 : New Zealand Winegrowers*.
- Nicholas, K. A. et Durham, W. H. (2012). Farm-scale adaptation and vulnerability to environmental stresses: Insights from winegrowing in Northern California. *Global Environmental Change*, 22(2), 483-494. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.01.001>
- Nicolosi, E., Ferlito, F., Allegra, M., Cicala, A., Trovato, F. et La Malfa, S. (2016). Influences of aspect and tillage on two winegrape cultivars on Mount Etna. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 44(2), 83-102. <https://doi.org/10.1080/01140671.2016.1147472>
- OIV. (2017). *Distribution variétale du vignoble dans le monde*. OIV - International organization of vine and wine.
- OIV. (2022). *Note de conjoncture vitivinicole mondiale 2021*, 20.
- OIV. (2023). *Note de conjoncture vitivinicole mondiale 2022*. OIV - International organization of vine and wine.
- Ollat, N. et Touzard, J.-M. (2020). La vigne, le vin, et le changement climatique en France. *Projet LACCAVE - Horizon 2050*, 1-5. <https://doi.org/10.15454/JT3Y-1A55>
- Ollat, N., Touzard, J.-M. et Leeuwen, C. van. (2016). Climate Change Impacts and Adaptations: New Challenges for the Wine Industry. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 139-149. <https://doi.org/10.1017/jwe.2016.3>

- Ollat, N., Zito, S., Richard, Y., Aigrain, P., Brugière, F., Duchêne, E., Garcia De Cortazar-Atauri, I., Gautier, J., Giraud-Héraud, E., Hannin, H., Touzard, J.-M. et Bois, B. (2021). La diversité des vignobles français face au changement climatique : simulations climatiques et prospective participative. *Climatologie*, 18, 3. <https://doi.org/10.1051/climat/202118003>
- Pagé, C., Terray, L. et Boé, J. (2008). *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08 (TR/CMGC/08/64)* [Rapport technique]. Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS).
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Borrelli, P., Köninger, J., Ballabio, C., Orgiazzi, A., Lugato, E., Liakos, L., Hervas, J., Jones, A. et Montanarella, L. (2022). European Soil Data Centre 2.0: Soil data and knowledge in support of the EU policies. *European Journal of Soil Science*, 73(6), e13315. <https://doi.org/10.1111/ejss.13315>
- Parker, A., de Cortázar-Atauri, I. G., Chuine, I., Barbeau, G., Bois, B., Boursiquot, J.-M., Cahurel, J.-Y., Claverie, M., Dufourcq, T., Gény, L., Guimberteau, G., Hofmann, R. W., Jacquet, O., Lacombe, T., Monamy, C., Ojeda, H., Panigai, L., Payan, J.-C., Lovelle, B. R., ... van Leeuwen, C. (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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 249-264. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.005>
- Parker, A. K., García de Cortázar-Atauri, I., Gény, L., Spring, J.-L., Destrac, A., Schultz, H., Molitor, D., Lacombe, T., Graça, A., Monamy, C., Stoll, M., Storchi, P., Trought, M. C. T., Hofmann, R. W. et van Leeuwen, C. (2020a). Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of *Vitis vinifera* L. cultivars. *Agricultural and Forest Meteorology*, 285-286, 107902. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107902>
- Parker, A. K., García de Cortázar-Atauri, I., Trought, M. C. T., Destrac, A., Agnew, R., Sturman, A. et Van Leeuwen, C. (2020b). Adaptation to climate change by determining grapevine cultivar differences using temperature-based phenology models. *OENO One*, 54(4), 955-974. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.3861>
- Parker, A. K., Garcia de Cortazar-Atauri, I., van Leeuwen, C. et Chuine, I. (2011). General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17, 206-216. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x>
- Pearce, P., Wooley, J.-M., Macara, G., Sood, A. et Fauchereau, N. (2018). *Climate change projections for New Zealand wine regions. Marlborough* [Rapport technique]. NIWA (National Institut of Water and Atmospheric Research).
- Pellegrino, A., Blackmore, D., Clingeffer, P. et Walker, R. (2022). Comparison of methods for determining budburst date in grapevine. *OENO One*, 56(1), 73-86. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.1.4751>
- Petitjean, T., Tissot, C., Thibault, J., Bonnardot, V., Rouan, M. et Quénot, H. (2022). Evaluation spatio-temporelle de l'exposition au gel en région viticoles traditionnelle (Pays de la Loire) et émergent (Bretagne). 35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie.
- Philippe, F., Sturman, A. et Quenol, H. (2013). Variabilité spatiale des températures dans le contexte du changement climatique a l'échelle du vignoble de Marlborough (Nouvelle-Zélande). *Climatologie*, 10, 123-145. <https://doi.org/10.4267/climatologie.132>

- Piegay, N. (2015). *Optimisation multi-objectif et aide à la décision pour la conception robuste.: Application à une structure industrielle sur fondations superficielles* [Thèse de doctorat en mécanique, Université de Bordeaux].
- Pinchera, D., Perna, S. et Migliore, M. (2017). A LEXICOGRAPHIC APPROACH FOR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION IN ANTENNA ARRAY DESIGN. *Progress In Electromagnetics Research M*, 59, 85-102. <https://doi.org/10.2528/PIERM17042106>
- Planchon, O. (1994). À propos de la notion de climat maritime (vol. 16, p. 119-130). *L'air du Temps, Etudes Méditerranéennes*.
- Planchon, O. (1997). *Les climats maritimes dans le monde* [These de doctorat en géographie, Université de Bourgogne]. <https://www.theses.fr/1996DIJOL026>
- Planchon, O. (1998). La notion d'échelle en climatologie : l'exemple des climats maritimes et côtiers en Europe. *Annales de géographie*, 107(602), 363-380. <https://doi.org/10.3406/geo.1998.20862>
- Planchon, O., Dubreuil, V., Damato, F., Gouéry, P. et Decaux, S. (2004). Recherche sur les types de temps associés aux brises de mer. *Norois. Environnement, aménagement, société*, (191), 59-74. <https://doi.org/10.4000/noroi.1027>
- Poling, E. B. (2008). Spring Cold Injury to Winegrapes and Protection Strategies and Methods. *HortScience*, 43(6), 1652-1662. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.6.1652>
- Qiao, W. et Yang, Z. (2019). Modified Dolphin Swarm Algorithm Based on Chaotic Maps for Solving High-Dimensional Function Optimization Problems. *IEEE Access*, 7, 110472-110486. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931910>
- Quénol, H. (2011). *Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique* [HDR]. Université Rennes 2.
- Quénol, H. (2014a). *Changement climatique et terroirs viticoles* (Lavoisier, Tec&doc). Lavoisier, Tec & doc.
- Quénol, H. (2014b). Terroirs viticoles et changement climatique : du global au local. Dans *Changement climatique et terroirs viticoles* (p. 23-36). Lavoisier Tec&doc. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01011454>
- Quénol, H., Atauri, I. G. de C., Bois, B., Sturman, A., Bonnardot, V. et Roux, R. L. (2017). Which climatic modeling to assess climate change impacts on vineyards? *OENO One*, 51(2), 91-97. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1869>
- Quénol, H. et Bonnardot, V. (2014). A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change : the "TERADCLIM" project. *International Journal of Wine Research*, 25-34.
- Quénol, H., Cukierman, J. et Bouffard, M. (2021). *Quel vin pour demain ? Le vin face aux défis climatiques* (Dunod). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03341812>
- Quénol, H. et Le Roux, R. (2020). Les impacts spatiaux du changement climatique sur la viticulture dans le monde. Dans *Les impacts spatiaux du changement climatique* (p. 227-246). ISTE Editions. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03047786>
- Quénol, H., Loussert, P., Madelin, M., M., G. et Corgne, S. (2015). Influence du climat local sur la viticulture dans la Province de Mendoza (Argentine). Dans *Actes du 28ème colloque de l'AIC* (p. 6).

- Quénol, H., Marie, G., Barbeau, G., Van Leeuwen, C., HOFMANN, M., Foss, C., Irimia, L., ROCHARD, J., Boulanger, J.-P., Tissot, C. et Miranda, C. (2014). Adaptation of viticulture to climate change: high resolution observations of adaptation scenario for viticulture: the adviclim european project. *Bulletin de l'OIV*, 87(1001-1002-1003), 395-406. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01150259>
- Quénol, H., Monteiro, A., Beltrando, G. et Maciel, A. (2004). Mesures climatiques aux échelles fines (météorologiques et agronomiques) et variabilité spatiale du gel printanier dans le vignoble de Vinho Verde (Portugal). *Norois. Environnement, aménagement, société*, (193), 117-132. <https://doi.org/10.4000/norois.826>
- Quénol, H. et Ollat, N. (2015). *Changement climatique. De modèles prédictifs mondiaux vers des méthodes d'adaptation à l'échelle de l'exploitation viticole*. <https://hal.inrae.fr/hal-02636657>
- Raju, K. S. et Kumar, D. N. (2020). Review of approaches for selection and ensembling of GCMs. *Journal of Water and Climate Change*, 11(3), 577-599. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.128>
- Ramos, M. C. et Jones, G. V. (2018). Relationships between Cabernet Sauvignon phenology and climate in two Spanish viticultural regions: observations and predicted future changes. *The Journal of Agricultural Science*, 156(9), 1079-1089. <https://doi.org/10.1017/S0021859618001119>
- Reardon, B. J. (1998). Fuzzy logic versus niched Pareto multiobjective genetic algorithm optimization. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 6(6), 717. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/6/6/004>
- Regnauld, H. et Planchon, O. (2003). La notion de limite et les objets morpho-climatiques littoraux: un enjeu théorique? *L'Information Géographique*, 67(1), 60-74. <https://doi.org/10.3406/ingeo.2003.2876>
- Rejalot, M. (2021). Le vignoble de Bordeaux: un vignoble en crise profonde. *Lucrările Seminarului Geografic « Dimitrie Cantemir »*, 49(1), 91-109. <http://www.seminarcantemir.uaic.ro/index.php/lsgdc/article/view/322>
- Riahi, K., Vuuren, D., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo Cuaresma, J., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J. et Tavoni, M. (2016). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rochard, J., Monamy, C., Pauthier, B. et Rocque, A. (2019). Stratégie et équipements de prévention vis-à-vis du gel de printemps et de la grêle. Perspectives en lien avec les changements climatiques, projet ADVICLIM. *BIO Web of Conferences*, 12, 01012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191201012>
- Rosier, J.-P. (2020). Viticulture d'altitude sur le plateau de Santa Catarina (Planalto Catarinense). *Territoires du vin*, (11). <http://preo.u-bourgogne.fr/territoiresduvin/index.php?id=1846>
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*, 2(1), 57-75.
- Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory and Decision*, 31(1), 49-73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>
- Rytkönen, P. (2013). Sweden – an emerging wine country : Valorising marginal lands for new types of production. *Ekdoseis Papazisi*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:sh:diva-21271>

- Saindrean, G. (2011). *La vigne et le vin en Bretagne* (Coop Breizh).
- Salas y Méliá, D. (2022). Les principaux enseignements du 6e rapport du groupe I du GIEC. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 106(2), 11-16. <https://doi.org/10.3917/re1.106.0011>
- Santibáñez, D. F. (2005). Influence du climat sur la production vitivinicole. *Wine internet technical journal*, (3), 12.
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., Moriondo, M., Leolini, L., Dibari, C., Costafreda-Aumedes, S., Kartschall, T., Menz, C., Molitor, D., Junk, J., Beyer, M. et Schultz, H. R. (2020). A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture. *Applied Sciences*, 10(9), 3092. <https://doi.org/10.3390/app10093092>
- Santos, J., Malheiro, A., Pinto, J. et Jones, G. (2012). Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing. *Climate Research*, 51(1), 89-103. <https://doi.org/10.3354/cr01056>
- Scherrer, P., Alonso, A. et Sheridan, L. (2009). Expanding the destination image: wine tourism in the Canary Islands. *International Journal of Tourism Research*, 11(5), 451-463. <https://doi.org/10.1002/jtr.713>
- Schirmer, R. (2007). Les vins du Nouveau Monde sont-ils a-géographiques. *Bulletin de l'Association de géographes français*, (1), 65. <https://doi.org/10.3406/bagf.2007.2543>
- Schultz, H. (2000). Climate change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(1), 2-12. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00156.x>
- Schultz, H. (2008). Climate change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6, 2-12. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00156.x>
- Schultz, H. R. et Jones, G. V. (2010). Climate Induced Historic and Future Changes in Viticulture. *Journal of Wine Research*, 21(2-3), 137-145. <https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530098>
- Schweidtmann, A. M., Weber, J. M., Wende, C., Netze, L. et Mitsos, A. (2020). Obey validity limits of data-driven models. *Optimization and Engineering*, 23, 855-876.
- Seguin, B. et Garcia de Cortazar, I. (2005). CLIMATE WARMING: CONSEQUENCES FOR VITICULTURE AND THE NOTION OF 'TERROIRS' IN EUROPE. *Acta Horticulturae*, (689), 61-70. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.689.3>
- Sgubin, G., Swingedouw, D., Dayon, G., García de Cortázar-Atauri, I., Ollat, N., Pagé, C. et van Leeuwen, C. (2018). The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 226-242. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>
- Sgubin, G., Swingedouw, D., García de Cortázar-Atauri, I., Ollat, N. et van Leeuwen, C. (2019). The Impact of Possible Decadal-Scale Cold Waves on Viticulture over Europe in a Context of Global Warming. *Agronomy*, 9(7), 397. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070397>
- Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R. et Tocquer, F. (2020). *Les nouvelles projections climatiques de références DRIAS 2020 pour la métropole*.

- Srinivas, N. et Deb, K. (1994). Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*, 2(3), 221-247.
- Stasinopoulos, T. N. (2006). The Four Elements of Santorini Architecture Lessons in Vernacular Sustainability. Dans *The 23rd Congerence on Passive and Low Energy Architecture* (p. 6).
- Sturman, A. et QuénoI, H. (2013). Changes in atmospheric circulation and temperature trends in major vineyard regions of New Zealand. *International Journal of Climatology*, 33(12), 2609-2621. <https://doi.org/10.1002/joc.3608>
- Sturman, A., Schulmann, T., Soltanzadeh, I., Gendig, E., Kawar-Reza, P., Katurji, M., Parker, A. et Trought, M. (2014). *Application of high-resolution climate measurement and modelling to the adaptation of New Zealand vineyard regions to climate variability*. <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/10564>
- Tachini, R., Fourment, M., Bonnardot, V., Fanzone, M. et Ferrer, M. (2022). Study of mesoclimate and its impact on *Vitis vinifera* L. cv. Tannat in the Atlantic winegrowing region of Uruguay. XIVth International Terroir Congress, 2nd ClimWine Symposium.
- Tafani, C. (2011). Valeurs foncières et spécificités géographiques des territoires insulaires touristiques : l'exemple du littoral corse. Dans *48ème colloque de l'Association de Science Régionale de langue française* (p. 20).
- Tait, A. B. (2008). Future projections of growing degree days and frost in New Zealand and some implications for grape growing. *Weather and Climate*, 28, 17-36. <https://doi.org/10.2307/26169696>
- Tegegne, G., Melesse, A. M. et Worqlul, A. W. (2020). Development of multi-model ensemble approach for enhanced assessment of impacts of climate change on climate extremes. *The Science of the Total Environment*, 704, 135357. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135357>
- The Luc, D. (2008). Pareto Optimality. Dans *Pareto Optimality, Game Theory And Equilibria* (Springer, vol. 17, p. 481-515). Springer Optimization and its Applications.
- Théry, H. (1990). Le renouveau des vignobles britanniques. *Mappemonde*, 18(2), 22-26. <https://doi.org/10.3406/mappe.1990.2568>
- Thibault, J., Quenol, H. et Tissot, C. (2022). Modélisation du potentiel des vignobles littoraux et insulaires dans le cadre du changement climatique. Dans *35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie* (p. 7).
- Thibault, J., Tissot, C. et QuénoI, H. (2020a). Island and coastal vineyards in the context of climate change. Dans *Proceedings of the XIIIth International Terroir Congress*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03087615>
- Thibault, J., Tissot, C. et QuénoI, H. (2020b). La viticulture littorale et insulaire dans le contexte du changement climatique (p. 661). *Changement Climatique et Territoires*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03087613>
- This, P., Lacombe, T. et Thomas, M. R. (2006). Historical origins and genetic diversity of wine grapes. *Trends in Genetics*, 22(9), 511-519. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2006.07.008>
- Thomas, P. (2011). Vins de l'abbaye de Lérins, de la « haute couture » en scapulaire. *Vins et Vignobles*, 28-30.

- Thomas, P. (2012). Vins de Chypre, un blason redoré grâce à l'Union Européenne. *Vins et Vignobles*, 32-33.
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T. et Nemani, R. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Scientific Data*, 9(1), 262. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
- Tissot, C. (2018). *Modélisation du déroulement d'activités anthropiques sous contraintes spatio-temporelles* [HDR]. Brest,, France.
- Tissot, C., Neethling, E., Rouan, M., Barbeau, G., Quénot, H. et Coq, C. (2017). Modeling Environmental Impacts on Viticultural Ecosystems: A First Case Study in a Regulated Wine Producing Area. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems (IJAEIS)*, 8. <https://doi.org/10.4018/ijaeis.2017070101>
- Tissot, C., Quenol, H. et Rouan, M. (2020). Adaptation de la viticulture argentine à la variabilité climatique : une approche par simulation dans la région de Mendoza. *Norois*, (254), 91-108. <https://doi.org/10.4000/norois.9668>
- Tissot, C., Rouan, M., Neethling, E., Quenol, H. et Brosset, D. (2014). Modeling of vine agronomic practices in the context of climate change. *BIO Web of Conferences*, 3, 01015. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20140301015>
- Tonietto, J. (2009). Climats et paysages viticoles. *Paysages et patrimoines viticoles, Chaire UNESCO « Culture et Traditions du Vin »*, 27-35.
- Tonietto, J. et Carbonneau, A. (2002). Thermal conditions during the grape ripening period in viticulture geoclimate. Dans *IVES Conference Series, Terroir* (p. 11).
- Tonietto, J. et Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1), 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>
- Trought, M. c. t. et Bramley, R. g. v. (2011). Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: characterising spatial and temporal changes in fruit composition and juice quality in the vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(1), 79-89. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00120.x>
- Trought, M. c. t., Dixon, R., Mills, T., Greven, M., Agnew, R., Mauk, J. L. et Praat, J.-P. (2008). The impact of differences in soil texture within a vineyard on vine vigour, vine earliness and juice composition | *OENO One*, 67-72. <https://oenone.eu/article/view/828>
- Trought, M., Parker, A., Sturman, A. et Agnew, R. (2016). Changing New Zealand climat equals a changing New Zealand terroir? Dans *IVES Conference Series, Terroir* (p. 6).
- Tudisca, S., Sgroi, F. et Testa, R. (2011). Competitiveness and sustainability of extreme viticulture in Pantelleria Island. *New Medit*, 10(4), 57-64.
- UNESCO. (2014). La pratique agricole traditionnelle de la culture de la « vite ad alberello » (taille de la vigne en gobelet) de la communauté de Pantelleria.
- Vahidinasab, V. et Jadid, S. (2010). Joint economic and emission dispatch in energy markets: A multiobjective mathematical programming approach. *Energy*, 35(3), 1497-1504. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.007>

- Van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D. et Gaudillere, J. P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One*, 43(3), 121-134. <https://oeno-one.eu/article/view/798>
- van Leeuwen, C. (2010). Terroir: the effect of the physical environment on vine growth, grape ripening and wine sensory attributes. Dans A. G. Reynolds (dir.), *Managing Wine Quality* (p. 273-315). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845699284.3.273>
- van Leeuwen, C., Bois, B., Cellié, N., Trégoat, O. et Roby, J. P. (2009). Les modifications de l'expression du terroir induites par le changement climatique nécessitent une adaptation du matériel végétal et des techniques viticoles. *Revue Française d'Oenologie*, (235), 10-14. <https://hal.inrae.fr/hal-02662072>
- van Leeuwen, C. et Darriet, P. (2016). The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 150-167. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>
- van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., de Rességuier, L. et Ollat, N. (2019). An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations. *Agronomy*, 9(9), 514. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>
- van Leeuwen, C., Friant, P., Choné, X., Tregcoat, O., Koundouras, S. et Dubourdiou, D. (2004). Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55(3), 207-217. <https://doi.org/10.5344/ajev.2004.55.3.207>
- van Leeuwen, C., Garnier, C., Agut, C., Baculat, B., Besnard, E., Bois, B., Boursiquot, J.-M. et Chuine, I. (2008). Heat requirements for grapevine varieties is essential information to adapt plant material in a changing climate. Dans *VIIIth International terroir Congress* (p. 7).
- van Leeuwen, C., Schultz, H. R., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Duchêne, E., Ollat, N., Pieri, P., Bois, B., Goutouly, J.-P., Quénot, H., Touzard, J.-M., Malheiro, A. C., Bavaresco, L. et Delrot, S. (2013). Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(33), E3051-E3052. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307927110>
- van Leeuwen, C. et Seguin, G. (1994). Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique de feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* cv. Cabernet franc, Saint-Emilion, 1990). *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 28, 91-110.
- van Leeuwen, C. et Seguin, G. (2006). The concept of terroir in viticulture. *Journal of Wine Research*, 17(1), 1-10. <https://doi.org/10.1080/09571260600633135>
- Vasconcelos, M. C., Greven, M., Winefield, C. S., Trought, M. C. T. et Raw, V. (2009). The Flowering Process of *Vitis vinifera*: A Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 60(4), 411-434. <https://doi.org/10.5344/ajev.2009.60.4.411>
- Vavoulidou, E., Avramides, E. J., Dimirkou, A. et Papadopoulos, P. (2006). Influence of Different Cultivation Practices on the Properties of Volcanic Soils on Santorini Island, Greece. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(15-20), 2857-2866. <https://doi.org/10.1080/00103620600832837>
- Velasco-Graciet, H. et Lasserre, F. (2006). Le vignoble au Québec, géographie d'un rêve sous contrainte. *Norois. Environnement, aménagement, société*, (201), 67-82. <https://doi.org/10.4000/norois.1765>

- Vetharaniam, I., Müller, K., Stanley, J., van den Dijssel, C., Tmar, L. et Cummins, M. (2022). *Modelling the effect of climate change on land suitability for growing perennial crops* (2022/06) [Technical paper]. Plant and Food Research, Prepared for Ministry for Primary Industries. <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/10/1639>
- Vinfiles. (2022). *La vigne dans les îles* [Master 2 Expertise et Gestion de l'Environnement Littoral].
- Vrontis, D. et Paliwoda, S. J. (2008). Branding and the Cyprus wine industry. *Journal of Brand Management*, 16(3), 145-159. <https://doi.org/10.1057/bm.2008.1>
- Wang, C. (2019). The “worlds approach” to gastronomic tourism: The case of wine tourism in Japan. Dans *The Routledge Handbook of Gastronomic Tourism*. Routledge.
- Wang, C. (2021). Creating a wine heritage in Japan. *Asian Anthropology*, 20(1), 61-76. <https://doi.org/10.1080/1683478X.2020.1773622>
- Webb, L. B., Whetton, P. H. et Barlow, E. W. R. (2011). Observed trends in winegrape maturity in Australia. *Global Change Biology*, 17(8), 2707-2719. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02434.x>
- Webb, M., Pirie, A., Kidd, D. et Minasny, B. (2017). Spatial analysis of frost risk to determine viticulture suitability in Tasmania, Australia: Analysis of frost risk for viticulture in Tasmania. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 24. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12314>
- Weise, T., Zapf, M., Chiong, R. et Nebro, A. (2009). Why Is Optimization Difficult? Dans *Studies in Computational Intelligence* (vol. 193, p. 1-50). https://doi.org/10.1007/978-3-642-00267-0_1
- White, M., Diffenbaugh, N., Jones, G., Pal, J. et Giorgi, F. (2006). Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103, 11217-22. <https://doi.org/10.1073/pnas.0603230103>
- Whitehall, K., Mattmann, C., Waliser, D., Kim, J., Goodale, C., Hart, A., Ramirez, P., Zimdars, P., Crichton, D. et Jenkins, G. (2012). L'expérience CORDEX: créer des capacités d'évaluation des modèles et des outils d'aide à la décision. *Bulletin de l'OMM*, 61(2), 29.
- Widmer, M. (2001). Les métaheuristiques : des outils performants pour les problèmes industriels. 3e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation « Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels » - MOSIM'01.
- Winkler, A. J. (1974). *General Viticulture*. University of California Press.
- Xiujuan, L. et Zhongke, S. (2004). Overview of multi-objective optimization methods. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 15(2), 142-146.
- Xyrafis, E. G., Deloire, A., Petoumenou, D., Paraskevopoulos, I. et Biniari, K. (2021). The unique and extreme vineyards of Santorini Island (Cyclades). *IVES Technical Reviews vine and wine*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2021.4848>
- Yamada, M. et Sato, A. (2016). Advances in table grape breeding in Japan. *Breeding Science*, 66(1), 34-45. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.66.34>
- Zitzler, E. et Thiele, L. (1998, mai). *An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach* [application/pdf]. ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-004288833>
- Zoumides, C., Giannakis, E., Bruggeman, A. et Camera, C. (2017). *Living terraced landscapes: Exploring the viability of mountain terraced vineyards in Cyprus*, 1303. EGU General Assembly Conference Abstracts. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..19.1303Z>

LISTE DES DEFINITIONS

Définition 1 - Fonction objectif.....	89
Définition 2 - Optimum.....	89
Définition 3 - Paramètres	89
Définition 4 - Vecteur d'objectifs	89
Définition 5 - Espace de recherche	89
Définition 6 - Espace des objectifs	89
Définition 7 - Contraintes	89
Définition 8 - Domaine réalisable.....	89
Définition 9 - Optimalité de Pareto	93
Définition 10 - Dominance de Pareto.....	93
Définition 11 - Sharing.....	105
Définition 12 - Efficacité.....	105

LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 - Formulation d'un problème mono-objectif.....	91
Équation 2 - Formulation d'un problème multiobjectifs	92
Équation 3 – Calcul de la date de débourrement - GDD.....	130
Équation 4 – Calcul du Grapevine Flowering Veraison	131
Équation 5 – Calcul du Grapevine Sugar Ripeness.....	132
Équation 6 - Régression linéaire	156

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Evolutions de la moyenne et des extrêmes de températures annuels : a) température moyenne par °C de variation moyenne mondiale entre 1986-205 et 2081-2100, b) 90 ^e centile de température journalière maximale par °C de température maximale moyenne mondiale entre 1980-1999 et 2081-2100	14
Figure 2 - Changement global de l’aptitude à la viticulture selon le RCP8.5, entre 1961-2000 et 2041-2600 Source : Hannah <i>et al.</i> , 2013	16
Figure 3 – Evolution des isothermes 12-22°C pour la viticulture entre 2000 et 2100.....	25
Figure 4 - Imbrication des différentes échelles spatiales en viticulture, appliquée à la parcelle de vignes de l’île d’Arz, dans le Morbihan, France	33
Figure 5 - Facteurs climatiques et météorologiques influençant le développement et les stades phénologiques de la vigne	38
Figure 6 - Indices de Winkler (a) et de Huglin (c) en Europe sur la période 1950-2009, et les différences entre les médianes de 1950-1979 et 1980-2009 pour l’indice de Winkler (b) et Huglin (d).....	44
Figure 7 – Exemples de stratégies d’adaptations d’une région viticole face à l’augmentation des températures et l’accroissement du stress hydrique	46
Figure 8 - Localisation des stations MétéoFrance.....	51
Figure 9 - Régimes pluviométriques moyens dans le Golfe du Morbihan (1991-2020).....	52
Figure 10 - Circulations de brise de mer (A) et de brise de terre (B).....	55
Figure 11 - Exemple de la première typologie réalisé. Vignobles DO Lanzarote, îles Canaries, Espagne	59
Figure 12 - Vignobles néozélandais exposés au gel, régions de Waipara et Marlborough, octobre 2020.....	60
Figure 13 - Murets de pierres protégeant les vignes des vents aux Açores (a), à Pantelleria (b), aux Canaries (c) et à Tenerife (d).....	62
Figure 14 - Différentes tailles de vigne, a) Guyot simple, b) Guyot double, c) Cordon de Royat, d) Cordon trezado, e) Biscoito, f) couronne ou <i>kouroula</i> , g) Vite ab Alberello, h) Gobelet, i) Pergola.....	64
Figure 15 - Répartition spatiale des 13 principales variétés dans le monde en 2015.....	66
Figure 16 - Vignobles néozélandais, région de Marlborough.....	71
Figure 17 -Vignobles « spécifiques » insulaires : a) Vignoble de l’Abbaye de Lérins à Saint-Honorat b) Vignoble de Santorin conduite en corbeille c) Vignoble de Ténérife conduit en rastra d) Vignoble de Lanzarote implanté en entonnoir	74
Figure 18 - Vignobles commerciaux bretons a) Sarzeau, b) Theix-Noyal, c) île de Groix, d) île d’Yeu.....	81

Figure 19 - Parcelle de vignes de l'île d'Arz.....	82
Figure 20 - Relations entre l'espace des recherches, l'espaces des obejctifs et les solutions optimales	90
Figure 21 - Représentations de l'optimalité de Pareto à gauche, et notion de dominance de Pareto à droite.....	94
Figure 22 - Méthode ϵ --contraintes pour un problème à deux objectifs	96
Figure 23 - Résumé graphique des méthodes ELECTRE	101
Figure 24 - Structuration générale du modèle MAUVE	113
Figure 25 - Structuration de la base de données de MAUVE	114
Figure 26 – Représentation des trajectoires socio-économiques des SSP	115
Figure 27 - Evolution des températures moyennes selon les RCP.....	117
Figure 28 - Etapes de scénarisation du modèle MAUVE	119
Figure 29 - Descente d'échelle, d'un modèle global à l'échelle régionale	120
Figure 30 - Classification des stades phénologiques de la vigne selon Baggiolini.....	121
Figure 31 - Matrices de contiguïté spatiale	124
Figure 32 - Etapes de l'initialisation du modèle MAUVE	127
Figure 33 - Etapes de simulation du modèle MAUVE	129
Figure 34 - Evolution de la surface et de la production viticole de Nouvelle-Zélande.....	142
Figure 35 - Localisation des principaux vignobles de Nouvelle-Zélande.....	143
Figure 36 - Température médiane annuelle en Nouvelle-Zélande.....	146
Figure 37 - Situation générale de Marlborough et des 11 stations météorologiques utilisées pour l'analyse de la variabilité spatiale entre 2008 et 2012	149
Figure 38 - Amplitudes thermiques moyennes mensuelles entre 2008 et 2012.....	149
Figure 39 - Analyse bivariée entre la distance à la mer en abscisse (km) et les occurences moyennes annuels de gel ($^{\circ}\text{C}$, $t_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$) et de fortes gelées ($^{\circ}\text{C}$, $T_n \leq -2^{\circ}\text{C}$) entre 2008 et 2012.....	150
Figure 40 - Différences moyennes des températures entre les modèles IPSL et ACCESS, sur la région de Marlboroug, Nouvelle-Zélande sur la période historique (1991-2010), à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long (2081-2100) terme pour les SSP2-4.5 et SSP5-8.5	155
Figure 41 - Localisation des stations météorologiques en Nouvelle Zélande par rapport au maillage climatique	157
Figure 42 - Comparaison des températures moyennes des modèles ACCESS (rouge) et IPSL (bleu) avec les températures observées de 11 stations météorologiques de Nouvelle-Zélande.	158

Figure 43 - Indice de Huglin sur la période historique (1+51-2010), à (1991-2010), à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long (2081-2100) terme pour la région de Marlborough.	160
Figure 44 - Fréquence d'année gélives (%) entre le débourrement et la maturité technique supposée, sur la période historique (1991-2010), à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long (2081-2100).....	161
Figure 45 - Résultats suboptimaux pour l'implantation du Pinot noir (noir) et du Sauvignon blanc (gris) à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long terme (2081-2100).....	162
Figure 46 - Résultats suboptimaux pour l'implantation du Pinot noir ou du Sauvignon blanc à court (2021-2040), moyen (2051-2070) et long terme (2081-2100).....	163
Figure 47 - Les principaux vignobles historiques de la Bretagne - a) vignoble du Val de Rance ; b) vignoble de Rhuys ; c) vignoble de Redon ; d) vignoble de Guérande ; d) vignoble nantais	167
Figure 48 - a) Températures moyennes annuelles (°C) pour les stations de Brest, Dinard, Lorient, Rennes et Rostrenen entre 1951 et 2021, b) Ecart de température moyennes saisonnières (°C) entre 1991-2020 et 1961-1990.....	170
Figure 49 - Réseaux de stations météorologiques installées en Bretagne.....	171
Figure 50 - a) Capteur thermique Tinytag au vignoble du Poulhors, Sarzeau, b) Station météorologique David Vantage Pro dans le Coteau de Liouse, île d'Arz.....	172
Figure 51 - Paramètres climatiques du 18 juin 2022 pour les stations météorologiques de l'île d'Arz, Sarzeau, Theix et Muzillac : a) Vitesse (m.s-1) et direction (°) du vent ; b) Températures (°C) et humidité relative (%).....	176
Figure 52 - Températures maximales (°C) à pas de temps horaires le 18 juin 2022, pour les stations d'Arz, Sarzeau, Theix et Muzillac.....	178
Figure 53 - Indice de Huglin calculé à court terme (2021-2040), à moyen terme (2041-2060) et à long terme (2081-2100) en région Bretagne, pour les RCP4.5 et RCP8.5.....	183
Figure 54 - Nombre moyen de jours de forte chaleur (>35°C) entre le débourrement et la maturité techniques du Cabernet Sauvignon, Petit Verdot ou Cinsault à court terme (2020-2041), moyen terme (2041-2060) et long terme (2061-2100) pour le RCP4.5 et RCP8.5	184
Figure 55 - Fréquence de gel (% d'années avec un épisode de gel après débourrement à en Bretagne à court terme (2020-2041), moyen terme (2041-2060) et long terme (2061-2100) pour le RCP4.5 et RCP8.5.....	185
Figure 56 - Résultats suboptimaux de MAUVE relatifs à l'implantation des cépages viticoles à court (2020-2040), moyen (2041-2060) et long (2081-2100) terme pour les RCP4.5 et RCP8.5. Région Bretagne, France.....	187
Figure 57 – a) Localisation des stations météorologiques MétéoFrance utilisées pour la descente d'échelles, b) Représentations des mailles climatiques issues des données projetées et de la descente d'échelle.....	189

Figure 58 – Résultats suboptimaux de MAUVE relatifs à l'implantation des cépages viticoles à moyen (2041-2060) et long (2081-2100) terme pour les RCP4.5 et RCP8.5. Golfe du Morbihan, Bretagne.	190
Figure 59 – Occupation du sol de la presqu'île de Rhuys.....	191
Figure 60 - Enchaînements d'incertitudes relatifs aux études des impacts du changement climatique.....	198
Figure 61 - Comparaison indice de Huglin à court (2021-2040), moyen (2041-2060) et long terme (2081-2100), pour le RCP4.5 et les modèles IPSL et CNRM	202
Figure 62 – Comparaison des solutions suboptimales par MAUVE des modèles climatiques IPSL et CNRM, pour la région Bretagne à court (2021-2040), moyen (2041-2060) et long terme (2081-2100).....	203
Figure 63 - Indice de Huglin calculé à court terme (2021-2040), à moyen terme (2041-2060) et à long terme (2081-2100) en région Bretagne et dans le Golfe du Morbihan pour le RCP8.5	205
Figure 64 - Nombre moyen a) de jours de forte chaleur (>35°C) et b) d'épisodes gélifs (<0°C) entre le débourrement et la maturité techniques du Cabernet Sauvignon, Petit Verdot ou Cinsault à court terme (2020-2041), moyen terme (2041-2060) et long terme (2061-2100). 206	206
Figure 65 - Indice de Huglin calculé à l'échelle européenne a) sur la période 1981-2005 avec les données observées, b) à horizon 2046-2070 avec le RCP8.5	207
Figure 66 - Simulation et validation de la date de floraison par le modèle GFV, et de la concentration en sucre de 170 g/l par le modèle GSR pour le Chardonnay, en Champagne, France, pour les RCP4.5 et RCP8.5, entre 1960 et 2100	208
Figure 67 - Influence du zonage sur l'agrégation des données.....	210

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 – Représentation des surfaces en vignes et de la production de vin en 2022, pour les dix pays détenant le plus de vignes au monde	13
Tableau 2 – Principaux indices bioclimatiques en viticulture.....	29
Tableau 3 - Indices écophysiologicals en viticulture	31
Tableau 4 - Températures minimales moyennes mensuelles (°C) entre 1991 et 2020	36
Tableau 5 - Températures maximales moyennes mensuelles (°C) entre 1991 et 2020.....	36
Tableau 6 – Données météorologiques horaires du 1 ^{er} avril 2022 00:00 au 21 octobre 2023 23:00	56
Tableau 7 - Répartition des 13 principales variétés mondiale en 2015.....	65
Tableau 8 - Superficie des principales cultures en Australie et en Nouvelle-Zélande en 202072	
Tableau 9 - Surfaces viticoles, production et exportation de vins pour la Nouvelle-Zélande et l'Australie en 2020.....	73
Tableau 10 - Evolution des surfaces en vigne pour la Corse, Chypre, la Grèce, la Sardaigne et la Sicile	77
Tableau 11 - Résumé des différents RCP.....	116
Tableau 12 - Exemple des relations indices bioclimatiques/stades phénologiques pour le Pinot noir ; stades phénologiques C : débourrement, I : floraison, M : véraison, N : maturité	122
Tableau 13 – Résumé des résultats et formats disponibles, annuellement et par maille, sous MAUVE	135
Tableau 14 - Superficie et production des principaux cépages de Nouvelle-Zélande en 2022	144
Tableau 15 - Caractéristiques climatiques des principales régions viticoles de Nouvelle-Zélande.....	147
Tableau 16 - Occurrences moyennes de jours de gel au printemps, sur la période 2008-2012	151
Tableau 17 - Températures durant la saison végétative 2022	174
Tableau 18 - Modèles climatiques, résolutions spatio-temporelles et domaines d'application	196

LISTES DES ANNEXES

Annexe 1 – Classification et évaluation statistique de a) 104 cépages pour leur date de véraison et b) 95 cépage pour la date de floraison	220
Annexe 2 – Classification et intervalles de confiance des cultivars pour le jour de l'année afin d'atteindre des concentrations en sucre de 170, 180, 190, 200, 210 et 220 g/l pour le modèle Grapevine Sugar Ripeness (GSR)	223
Annexe 3 - Exemple de typologie des vignobles littoraux et insulaires	224
Annexe 4 - Classifications Corine Land Cover	226
Annexe 5 - Classification des sols.....	227

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	5
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	8
SOMMAIRE	11
INTRODUCTION GENERALE	13
PARTIE 1. LA VITICULTURE LITTORALE ET INSULAIRE.....	21
CHAPITRE 1 CLIMAT(S) ET CULTURE DE LA VIGNE	23
1. <i>Délimitation des climats viticoles.....</i>	24
1.1. Les limites de la culture de la vigne.....	24
1.2. Représentation du zonage viticole, les indices bioclimatiques.....	26
1.3. Représentations écoclimatiques et les indices écophysologiques.....	30
2. <i>Variabilités climatiques et impacts sur la viticulture</i>	32
2.1. Du climat régional au climat local, une imbrication de différentes échelles	32
2.2. L'influence des facteurs locaux sur le climat	34
3. <i>Les réponses de la vigne au climat.....</i>	37
3.1. Influences des paramètres climatiques sur la croissance de la vigne et la maturation du raisin	37
3.1.1. Le rayonnement solaire.....	39
3.1.2. Les températures	39
3.1.3. Les précipitations	41
3.1.4. Le vent.....	42
3.2. La viticulture face au changement climatique.....	43
4. <i>Conclusion de chapitre.....</i>	47
CHAPITRE 2 LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES VIGNOBLES LITTORAUX ET INSULAIRES	49
1. <i>Caractéristiques biophysiques des espaces viticoles littoraux et insulaires</i>	50
1.1. Un climat propre au littoral et aux îles	50
1.1.1. Le régime pluviométrique	50
1.1.2. La brise littorale.....	53
1.1.3. Les températures	56
2. <i>Diversité des configurations agroclimatiques des vignobles littoraux et insulaires</i>	58
2.1. Le mode de conduite.....	61
2.2. Le matériel végétal.....	65
2.3. Le sol	68
3. <i>Configurations spatiale et socio-économique des vignobles littoraux et insulaires</i>	69
3.1. Îles-pays, vastes vignobles et productions intensives destinées à l'exportation	71
3.2. Vignobles insulaires et de grandes renommées.....	73
3.3. Vignobles traditionnels, avec mise en valeur insulaires et transition qualitative	76
3.4. Vignobles de petite taille, à commercialisation et rayonnement à l'échelle insulaire	78
3.5. Vignobles implantés dans de nouvelles zones d'opportunité	80
3.6. Parcelles de vigne de petites tailles et non professionnelles.....	82
4. <i>Conclusion de chapitre.....</i>	83
CONCLUSION PREMIERE PARTIE	84

PARTIE 2. MODELISATION SPATIALE ET MULTIOBJECTIFS DES VIGNOBLES POTENTIELS 85

CHAPITRE 3 LA MODELISATION MULTIOBJECTIFS	87
1. <i>L'optimisation, principes et concepts</i>	88
1.1. Introduction à l'optimisation.....	88
1.2. Terminologie et concepts de base de l'optimisation	89
1.3. L'optimisation mono-objectif.....	91
2. <i>Le problème d'optimisation multiobjectifs</i>	92
2.1. Le principe de l'optimisation multiobjectifs	92
2.2. Concepts et définitions de l'optimisation multiobjectifs, au sens de Pareto	93
3. <i>Les différentes méthodes d'optimisation multiobjectifs</i>	95
3.1. Les principales méthodes d'optimisation multiobjectifs	95
3.1.1. Les méthodes scalaires.....	95
3.1.2. Les méthodes interactives.....	97
3.1.3. La logique floue.....	98
3.1.4. Les métaheuristiques	99
3.1.5. L'aide à la décision	100
3.2. Classification procédurale des méthodes d'optimisation	102
3.2.1. La prise de décision	102
3.2.2. Le traitement des objectifs.....	103
3.2.3. La recherche des solutions	105
4. <i>Conclusion de chapitre</i>	108

CHAPITRE 4 MODELISATION DE L'ADAPTATION SUBOPTIMALE DES VIGNOBLES EMERGENTS ET EXISTANTS : LE MODELE MAUVE	109
1. <i>Généralités de MAUVE</i>	110
1.1. Introduction au modèle	110
1.2. Structuration générale et définitions du modèle	111
2. <i>Les données d'entrée du modèle</i>	114
2.1. Les données climatiques	114
2.2. Les données biophysiques.....	118
3. <i>Fonctionnement du modèle</i>	119
3.1. Définition d'un scénario.....	119
3.1.1. Import des données climatiques, et résolution de la zone d'étude	120
3.1.2. Sélection des variétés à planter	121
3.1.3. Définitions des contraintes	123
3.1.4. Définition des objectifs	125
3.2. Etape d'initialisation	127
3.3. La simulation	128
3.3.1. Phénologie et occurrences de vulnérabilité relatives aux objectifs	130
3.3.2. Sélection des solutions suboptimales.....	133
3.4. Les sorties du modèle	134
4. <i>Conclusion de chapitre</i>	136
CONCLUSION DEUXIEME PARTIE	137

PARTIE 3. RESULTATS ET CAS D'APPLICATION	139
CHAPITRE 5 ANALYSE DE L'EVOLUTION SPATIALE DES ZONES VITICOLES SUBOPTIMALES EN NOUVELLE-ZELANDE	141
1. <i>Le contexte viticole néozélandais</i>	142
2. <i>Le contexte climatique</i>	145
2.1. Le contexte régional.....	145
2.2. Le contexte local	148
3. <i>Modélisation des potentialités viticoles néozélandaises futures</i>	152
3.1. Scénarisation.....	152
3.1.1. Modèle climatique et scénario	152
3.1.2. Cépages à implanter	153
3.1.3. Définition des contraintes	153
3.1.4. Définition des objectifs.....	154
3.2. Analyse de l'évolution des principaux indicateurs.....	155
3.2.1. Comparaison des modèles climatiques	155
3.2.2. Evolution de l'indice héliothermique de Huglin.....	159
3.2.3. Le risque d'évènements climatiques extrêmes	160
3.3. Résultats d'optimisation	161
4. <i>Conclusion de chapitre</i>	164
CHAPITRE 6 ANALYSE DE L'EMERGENCE POTENTIELLE DE ZONES VITICOLES SUBOPTIMALES EN BRETAGNE, FRANCE	165
1. <i>Le contexte viticole breton</i>	166
2. <i>Le contexte climatique breton</i>	169
2.1. Contexte climatique régional	169
2.2. Contexte climatique local.....	171
3. <i>Modélisation des potentialités viticoles futures à l'échelle de la région Bretagne</i>	179
3.1. Scénarisation.....	179
3.1.1. Modèle climatique et des scénarios associés.....	179
3.1.2. Choix de cépages	180
3.1.3. Définition des contraintes.....	181
3.1.4. Définition des objectifs	181
3.2. Analyse de l'évolution des potentialités viticoles bretonnes futures.....	182
3.2.1. Bilan héliothermique	182
3.2.2. Le risque d'évènements climatiques extrêmes	183
3.3. Résultats de l'optimisation	186
4. <i>Expérimentation à plus haute résolution</i>	188
4.1. Scénarisation.....	188
4.2. Résultats de l'optimisation	190
5. <i>Conclusion de chapitre</i>	192
CHAPITRE 7 ANALYSE DE L'INCERTITUDE DANS LA DEMARCHE D'OPTIMISATION	195
1. <i>Identification des sources d'incertitudes</i>	196
1.1. La modélisation climatique	196
1.1.1. Les biais et incertitudes	197
1.1.2. Les limites des résolutions.....	199
1.2. Les données de sols et d'occupations de sol	200
2. <i>Evaluation de l'incertitude dans le modèle MAUVE</i>	201
2.1. Les modèles climatiques	201
2.2. La descente d'échelle	204
2.3. Les indices bioclimatiques.....	207
2.4. Les données relatives aux sols.....	209
3. <i>Quelques voies d'amélioration du modèle MAUVE</i>	211
CONCLUSION TROISIEME PARTIE.....	213
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	214

ANNEXES.....	220
BIBLIOGRAPHIE	230
LISTE DES DEFINITIONS.....	252
LISTE DES EQUATIONS	252
LISTE DES FIGURES.....	253
LISTES DES TABLEAUX.....	257
LISTES DES ANNEXES	258
TABLE DES MATIERES	259

Titre : Modélisation de l'adaptation de la viticulture littorale et insulaire au changement climatique

Mots clés : optimisation, multiobjectifs, contraintes, vignobles émergents, vignobles traditionnels

Résumé : La perspective du changement climatique, et en particulier la hausse des températures, représentent des défis majeurs pour l'industrie vitivinicole. Plusieurs études basées sur l'adaptation des vignobles à différents scénarios du changement climatique démontrent que l'on peut s'attendre à d'importantes transformations à l'échelle mondiale. Dans un contexte d'augmentation des températures et des extrêmes climatiques, les spécificités des espaces littoraux et insulaires pourraient constituer des avantages majeurs pour la viticulture dans les années à venir. Pour autant, ces espaces soumis à d'importantes contraintes soulèvent la question des conditions d'implantation ou d'extension de la viticulture.

Dans la perspective d'identifier des zones d'aptitude viticole pérennes dans un contexte

de changement climatique, une démarche d'optimisation capable d'intégrer des facteurs abiotiques, biotiques et anthropiques semble pertinente.

Ainsi, cette recherche doctorale vise à comprendre les spécificités agroclimatiques des espaces littoraux et insulaires et propose une approche d'optimisation spatiale et multicritères permettant d'identifier des zones d'implantation suboptimales pour différents scénarios de changement climatique. Cette approche, testée dans deux régions viticoles aux configurations et enjeux différents, démontre que si les espaces littoraux et insulaires semblent être adaptés aux conditions futures, les configurations et contraintes locales de ces sites complexifient l'implantation ou l'extension de la viticulture.

Title : Modeling the adaptation of insular and coastal vineyard to climate change

Keywords : optimisation, multi-objective, constraints, emerging vineyards, traditional vineyards

Abstract : The prospect of climate change, and especially the increase of temperature, represent major challenges for the wine industry. Several studies based on the adaptation of vineyards to different climate change scenarios demonstrate that we can expect major transformations on a global scale. In a context of increasing temperatures and climatic extremes, the specific characteristics of coastal and island areas could provide major advantages for viticulture in future years. However, these areas are subject to multiple constraints which raises issues about the conditions under which winegrowing can be established or extended.

In order to identify areas of sustainable viticultural suitability in a context of climate

change, an optimization approach able to integrate abiotic, biotic and anthropic factors seems relevant.

This doctoral research aims to understand the agroclimatic specificities of coastal and island areas, and proposes a spatial and multi-criteria optimization approach to identify suboptimal implantation areas for different climate change scenarios. This approach, tested in two wine-growing regions with very different configurations and challenges, demonstrates that while coastal and island areas appear to be well adapted to future climatic conditions, the local configurations and constraints of these sites make it more difficult, or even challenge, the establishment or extension of wine-growing.